



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

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

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN DE GAS DE  
SÍNTESIS EN BOMBAS DE COMBUSTIÓN A VOLUMEN  
CONSTANTE PARA SU UTILIZACIÓN EN MOTORES DE  
COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS**

Autor: D. Mario Nieto Salinas

Tutor: Dña. Miriam Reyes Serrano

Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica

Valladolid, Junio de 2019



# RESUMEN

---

La necesidad de desarrollar nuevos combustibles alternativos para su utilización en motores de combustión interna, como consecuencia de la creciente contaminación atmosférica en las ciudades, ha motivado la realización del presente trabajo fin de máster, que pretende caracterizar el proceso de combustión del gas de síntesis, representado mediante mezclas H<sub>2</sub>-CO, que son sus constituyentes principales.

Para ello, ha sido necesaria la experimentación con dos bombas de combustión a volumen constante, con geometrías esférica y cilíndrica, ésta última presenta dos accesos ópticos a través de los cuales se puede visualizar y grabar el proceso de combustión. En la primera de ellas, la presión registrada durante la combustión ha sido tratada mediante un modelo de diagnóstico de dos zonas, obteniendo las presiones y velocidades de combustión. Este mismo modelo ha sido utilizado para procesar los datos en la bomba cilíndrica, en la que adicionalmente, se ha realizado el análisis de las imágenes Schlieren, extrayendo así la morfología de la llama, la evolución del frente de llama o la velocidad de combustión laminar, entre otros parámetros del proceso.

Para unas condiciones de 1 bar y 300 K, se han estudiado mezclas con distintas composiciones y dosados. Se ha comprobado que el hidrógeno es un potenciador de la combustión, ya que mayores contenidos en éste implican incrementos en la presión y la velocidad de combustión, efectos similares a los producidos al aumentar el dosado. En cuanto a la morfología de las llamas, destacar que éstas tienden al arrugamiento y la celularidad a medida que aumenta el contenido en hidrógeno de la mezcla y disminuye el dosado.

Comparando los resultados obtenidos en las dos bombas, se ha comprobado que las presiones registradas en la cilíndrica son inferiores, debido a la deformación del frente de llama esférico, como consecuencia de la geometría de la cámara de combustión.

Finalmente, mediante la comparación de los resultados de la velocidad de combustión obtenidos en la bomba esférica, a través el análisis de las presiones, y en la bomba cilíndrica, mediante el tratamiento de las imágenes, con los de diferentes autores de la bibliografía, se ha comprobado la coherencia y validez de los mismos.

**Palabras clave:** Gas de síntesis, mezcla H<sub>2</sub>-CO, bomba de combustión a volumen constante, velocidad de combustión, celularidad.



# ABSTRACT

---

The need to develop new alternative fuels for use in internal combustion engines, as a consequence of the increasing atmospheric pollution in the cities, has motivated the realization of this master's thesis, which aims to characterize the synthesis gas combustion process, represented by H<sub>2</sub>-CO mixtures, which are its main constituents.

For this, it has been necessary to experiment with two combustion pumps at constant volume, with spherical and cylindrical geometries, the latter has two optical accesses through which the combustion process can be visualized and recorded. In the first one, the pressure registered during the combustion has been treated by a two-zone diagnostic model, obtaining the pressures and burning velocities. The same model has been used to processing the data in the cylindrical pump, in which additionally, the analysis of the Schlieren images has been carried out, thus extracting the morphology of the flame, the evolution of the flame front or the laminar burning velocities, among other parameters of the process.

For conditions of 1 bar and 300 K, mixtures with different compositions and equivalence ratios have been studied. It has been proved that hydrogen is a combustion enhancer, since higher contents in it imply increases in the pressure and the burning velocities, effects similar to those produced by increasing the equivalence ratio. Regarding the morphology of the flames, note that these tend to wrinkling and cellularity as the hydrogen content of the mixture increases and the equivalence ratios decreases.

Comparing the results obtained in the two pumps, it has been verified that the pressures registered in the cylindrical are lower, due to the deformation of the spherical flame front, as a consequence of the geometry of the combustion chamber.

Finally, comparing the results of the burning velocities obtained in the spherical pump, through the analysis of the pressures, and in the cylindrical pump, by means of the treatment of the images, with those of different authors of the bibliography, has checked the consistency and validity of them.

**Keywords:** Syngas, H<sub>2</sub>-CO mixture, constant volume combustion pump, burning velocity, cellularity.



### ***Agradecimientos***

*A mi tutora Miriam, por sus consejos y dedicación permanente durante la realización de este trabajo fin de máster.*

*A Alexandra, por la ayuda prestada y los buenos momentos compartidos en el laboratorio.*

*A mis padres, a Leticia y a Tito, por su apoyo incondicional durante toda esta etapa, sin los cuales no habría conseguido llegar hasta aquí.*



# ÍNDICE

---

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1.     | INTRODUCCIÓN.....  | 1  |
| 1.1.   | Introducción .....   | 3  |
| 1.2.   | Antecedentes y justificación.....                            | 4  |
| 1.3.   | Objetivos y alcance del trabajo .....                        | 5  |
| 2.     | ESTADO DEL ARTE .....  | 7  |
| 2.1.   | Motores de Combustión Interna Alternativos (MCIA) .....      | 9  |
| 2.2.   | Combustión en MEP.....                                       | 10 |
| 2.2.1. | Combustión normal.....                                       | 10 |
| 2.2.2. | Combustión anormal.....                                      | 11 |
| 2.2.3. | Emisiones contaminantes .....                                | 13 |
| 2.3.   | Parámetros de la combustión .....                            | 15 |
| 2.3.1. | Velocidad de combustión laminar .....                        | 15 |
| 2.3.2. | Inestabilidades del frente de llama: Celularidad .....       | 16 |
| 2.3.3. | Geometría de la llama. Stretch .....                         | 18 |
| 2.4.   | Combustibles.....  | 19 |
| 2.4.1. | Combustibles convencionales.....                             | 19 |
| 2.4.2. | Combustibles gaseosos alternativos .....                     | 20 |
| 2.4.3. | Investigaciones sobre la combustión del gas de síntesis..... | 25 |
| 3.     | EXPERIMENTAL.....  | 27 |
| 3.1.   | Instalación.....   | 29 |
| 3.1.1. | Bomba de combustión cilíndrica .....                         | 29 |
| 3.1.2. | Bomba de combustión esférica .....                           | 33 |
| 3.2.   | Metodología Experimental .....                               | 35 |
| 3.2.1. | Parámetros experimentales.....                               | 35 |
| 3.2.2. | Preparación de la BCVC.....                                  | 36 |
| 3.2.3. | Llenado de la BCVC.....                                      | 36 |
| 3.2.4. | Homogeneización de la mezcla .....                           | 37 |
| 3.2.5. | Combustión.....  | 37 |
| 3.2.6. | Adquisición de datos .....                                   | 37 |
| 3.3.   | Tratamiento de datos .....                                   | 39 |
| 3.3.1. | Modelo de Diagnóstico de Dos Zonas .....                     | 39 |
| 3.3.2. | Procesado de Imágenes .....                                  | 41 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 4.     | RESULTADOS.....  | 45 |
| 4.1.   | Introducción a los resultados .....  | 47 |
| 4.2.   | Bomba Esférica.....  | 48 |
| 4.2.1. | Estudio Paramétrico: Resultados del modelo de diagnóstico de dos zonas ..... | 48 |
| 4.2.2. | Comparación y validación con la bibliografía.....                            | 55 |
| 4.3.   | Bomba Cilíndrica .....   | 57 |
| 4.3.1. | Estudio Paramétrico: Resultados del modelo de diagnóstico de dos zonas ..... | 57 |
| 4.3.2. | Estudio Paramétrico: Análisis de las imágenes .....                          | 61 |
| 4.4.   | Comparación entre las bombas esférica y cilíndrica .....                     | 73 |
| 4.4.1. | Influencia de la composición de la mezcla .....                              | 73 |
| 4.4.2. | Influencia del dosado .....  | 74 |
| 4.4.3. | Comparación y validación con la bibliografía.....                            | 76 |
| 5.     | CONCLUSIONES .....   | 79 |
| 5.1.   | Conclusiones.....  | 81 |
| 5.1.1. | Conclusiones generales.....  | 81 |
| 5.1.2. | Conclusiones específicas.....  | 81 |
| 5.2.   | Aportaciones .....   | 82 |
| 5.3.   | Trabajos futuros .....   | 83 |
| 6.     | REFERENCIAS.....   | 85 |

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

|   |    |
|---|----|
| <b>Fig 1.1.</b> Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero de los principales sectores, en los últimos años [3].   | 3  |
| <b>Fig 2.1.</b> Avance del frente de llama en un MEP [11].  | 10 |
| <b>Fig 2.2.</b> Efecto del autoencendido sobre la curva de presión (izquierda) y la fracción de calor liberado (derecha) [11].  | 11 |
| <b>Fig 2.3.</b> Efecto del picado sobre un pistón [11].   | 12 |
| <b>Fig 2.4.</b> Evolución de las emisiones contaminantes en el escape de un MEP en función del dosado de operación [11].  | 13 |
| <b>Fig 2.5.</b> Evolución temporal de una perturbación del frente de llama en función del Le [13].  | 17 |
| <b>Fig 2.6.</b> Inestabilidad por fuerzas de volumen (izquierda) y de origen hidrodinámico y/o termo-difusivas (resto) [25].  | 18 |
| <b>Fig 2.7.</b> Concentraciones de emisiones de CO, CO <sub>2</sub> y NO <sub>x</sub> del motor operado con gas de síntesis y gasolina, para diferentes potencias [51]. | 24 |
| <b>Fig 3.1.</b> Bomba de combustión cilíndrica, espejos y cámara de alta velocidad.   | 29 |
| <b>Fig 3.2.</b> Electrodo del sistema de encendido y fuente de alimentación externa.  | 30 |
| <b>Fig 3.3.</b> Transductores piezorresistivos y válvulas de cierre.  | 30 |
| <b>Fig 3.4.</b> Transductor piezoeléctrico y amplificador Kistler.  | 30 |
| <b>Fig 3.5.</b> Controlador PID y resistencias.   | 31 |
| <b>Fig 3.6.</b> Combustibles en botellas de alta presión y sus medidas de seguridad.  | 31 |
| <b>Fig 3.7.</b> Sistemas de conductos, válvulas y sensores de presión para el suministro de aire y combustible.   | 31 |
| <b>Fig 3.8.</b> Diodo LED, espejos y diafragma obturador.   | 32 |
| <b>Fig 3.9.</b> Videocámara de alta velocidad Phantom v210.   | 32 |
| <b>Fig 3.10.</b> Osciloscopio digital Yokogawa.   | 32 |
| <b>Fig 3.11.</b> Esquema de la instalación de la BCVC cilíndrica [67].  | 33 |
| <b>Fig 3.12.</b> Bomba de combustión esférica.  | 33 |
| <b>Fig 3.13.</b> Sistema de sensores, válvulas y conductos para el llenado de la bomba.   | 34 |
| <b>Fig 3.14.</b> Instalación completa de la BCVC esférica.  | 34 |
| <b>Fig 3.15.</b> Hoja Excel para el cálculo de presiones de llenado de la BCVC.   | 36 |
| <b>Fig 3.16.</b> Adquisición de datos y tratamiento de los resultados de los experimentos. Adaptada de Pérez [7].   | 38 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Fig 3.17.</b> Interfaz del programa de Matlab con el cálculo del radio del frente de llama (superior izquierda), la celularidad (inferior izquierda) y el panel de control para la ejecución del programa. ....  | 42 |
| <b>Fig 3.18.</b> Evolución del radio del frente de llama proporcionado por Matlab (azul) y su ajuste (rojo). 25% H <sub>2</sub> - 75% CO, Fr = 0.7, p = 1 bar, T = 300 K.....   | 43 |
| <b>Fig 3.19.</b> Error entre el radio proporcionado por Matlab y el radio ajustado, en función del tiempo. 25% H <sub>2</sub> - 75% CO, Fr = 0.7, p = 1 bar, T = 300 K. ....  | 43 |
| <b>Fig 3.20.</b> Evolución de la velocidad de propagación frente a la tasa de stretch de la llama, y obtención de la velocidad de propagación sin stretch, S <sub>f</sub> <sup>0</sup> . 6.7% H <sub>2</sub> - 93.3% CO, Fr = 0.7, p = 1 bar, T = 300 K.....                                      | 44 |
| <b>Fig 4.1.</b> Influencia de la composición de la mezcla en la evolución de la presión frente al tiempo, en la bomba esférica. %H <sub>2</sub> = 0, 6.7, 25, 50 y 100%, Fr = 1, p = 1 bar, T = 300 K. ....   | 48 |
| <b>Fig 4.2.</b> Influencia de la composición de la mezcla en la velocidad de combustión laminar frente a la temperatura de la mezcla fresca, en la bomba esférica. %H <sub>2</sub> = 0, 6.7, 25, 50 y 100%, Fr = 1, p = 1 bar, T = 300 K.....   | 49 |
| <b>Fig 4.3.</b> Evolución de los coeficientes de velocidad (C <sub>c0</sub> ), temperatura (α) y presión (β) en función de la composición de la mezcla. %H <sub>2</sub> = 0, 6.7, 25, 50 y 100%, Fr = 1, p = 1 bar, T = 300 K. ....   | 50 |
| <b>Fig 4.4.</b> Influencia del dosado en la evolución de la presión frente al tiempo, en la bomba esférica. 6.7% H <sub>2</sub> - 93.3% CO, 25% H <sub>2</sub> - 75% CO, 50% H <sub>2</sub> - 50% CO, Fr = 0.5 - 1, p = 1 bar, T = 300 K.....   | 51 |
| <b>Fig 4.5.</b> Influencia del dosado en la evolución de la velocidad de combustión laminar frente a la temperatura de la mezcla fresca, en la bomba esférica. 6.7% H <sub>2</sub> - 93.3% CO, 25% H <sub>2</sub> - 75% CO, 50% H <sub>2</sub> - 50% CO, Fr = 0.5 - 1, p = 1 bar, T = 300 K. .... | 52 |
| <b>Fig 4.6.</b> Evolución de los coeficientes de velocidad (C <sub>c0</sub> ), temperatura (α) y presión (β), en función del dosado. 6.7% H <sub>2</sub> - 93.3% CO, 25% H <sub>2</sub> - 75% CO, 50% H <sub>2</sub> - 50% CO, Fr = 0.5-1, p = 1 bar, T = 300 K. ....                             | 53 |
| <b>Fig 4.7.</b> Comparación con los datos de la bibliografía de la velocidad de combustión laminar frente al dosado. 6.7%H <sub>2</sub> – 93.3%CO, Fr = 0.5-1, p = 1 bar, T = 300 K. ....   | 55 |
| <b>Fig 4.8.</b> Comparación con los datos de la bibliografía de la velocidad de combustión laminar frente al dosado. 25%H <sub>2</sub> – 75%CO, Fr = 0.5-1, p = 1 bar, T = 300 K. ....  | 56 |
| <b>Fig 4.9.</b> Comparación con los datos de la bibliografía de la velocidad de combustión laminar frente al dosado. 50%H <sub>2</sub> – 50%CO, Fr = 0.5-1, p = 1 bar, T = 300 K. ....  | 57 |
| <b>Fig 4.10.</b> Influencia de la composición de la mezcla en la evolución de la presión frente al tiempo, en la bomba cilíndrica. %H <sub>2</sub> = 0, 6.7, 25, 50, 80 y 100%, Fr = 1, p = 1 bar, T = 300 K... ..  | 58 |
| <b>Fig 4.11.</b> Influencia de la composición de la mezcla en la evolución de la velocidad de combustión laminar frente a la temperatura de la mezcla fresca, en la bomba cilíndrica. %H <sub>2</sub> = 0, 6.7, 25, 50, 80 y 100%, Fr = 1, p = 1 bar, T = 300 K. ....                             | 58 |

**Fig 4.12.** Influencia del dosado en la evolución de la presión frente al tiempo, en la bomba cilíndrica. 6.7% H<sub>2</sub> - 93.3% CO, 25% H<sub>2</sub> - 75% CO, 50% H<sub>2</sub> - 50% CO, **Fr = 0.5 - 1**, p = 1 bar, T = 300 K. .... 59

**Fig 4.13.** Influencia del dosado en la evolución de la velocidad de combustión laminar frente a la temperatura de la mezcla fresca, en la bomba cilíndrica. 6.7% H<sub>2</sub> - 93.3% CO, 25% H<sub>2</sub> - 75% CO, 50% H<sub>2</sub> - 50% CO, **Fr = 0.5 - 1**, p = 1 bar, T = 300 K. .... 60

**Fig 4.14.** Evolución de las imágenes Schlieren, para diferentes radios de llama al variar la composición de la mezcla, en la bomba cilíndrica. **0% H<sub>2</sub> – 100% CO, 6.7% H<sub>2</sub> – 93.3% CO, 25% H<sub>2</sub> – 75% CO, 50% H<sub>2</sub> – 50% CO, 80% H<sub>2</sub> – 20% CO, 100% H<sub>2</sub> – 0% CO**, Fr = 1, p = 1 bar, T = 300 K. .... 62

**Fig 4.15.** Evolución del radio del frente de llama respecto al tiempo, en la bomba cilíndrica. **% H<sub>2</sub> = 0, 6.7, 25, 50, 80 y 100%**, Fr = 1, p = 1 bar, T = 300 K..... 63

**Fig 4.16.** Evolución de la velocidad de propagación del frente de llama respecto al radio del mismo, en la bomba cilíndrica. **%H<sub>2</sub> = 0, 6.7, 25, 50, 80 y 100%**, Fr = 1, p = 1 bar, T = 300 K... 63

**Fig 4.17.** Evolución de la velocidad de propagación del frente de llama respecto a la tasa de stretch, en la bomba cilíndrica. **%H<sub>2</sub> = 0, 6.7, 25, 50, 80 y 100%**, Fr = 1, p = 1 bar, T = 300 K. .. 64

**Fig 4.18.** Influencia de la fracción de hidrógeno de la mezcla en la velocidad de propagación de la llama sin stretch, en la bomba cilíndrica. **%H<sub>2</sub> = 0, 6.7, 25, 50, 80 y 100%**, Fr = 1, p = 1 bar, T = 300 K. .... 65

**Fig 4.19.** Influencia de la fracción de hidrógeno de la mezcla en la velocidad de combustión laminar, en la bomba cilíndrica. **%H<sub>2</sub> = 0, 6.7, 25, 50, 80 y 100%**, Fr = 1, p = 1 bar, T = 300 K. . 65

**Fig 4.20.** Evolución de las imágenes Schlieren, para diferentes radios de llama al variar el dosado, en la bomba cilíndrica. **6.7% H<sub>2</sub> – 93.3% CO, Fr = 0.5-1**, p = 1 bar, T = 300 K..... 67

**Fig 4.21.** Evolución de las imágenes Schlieren, para diferentes radios de llama al variar el dosado, en la bomba cilíndrica. **25% H<sub>2</sub> – 75% CO, Fr = 0.5-1**, p = 1 bar, T = 300 K..... 68

**Fig 4.22.** Evolución de las imágenes Schlieren, para diferentes radios de llama al variar el dosado, en la bomba cilíndrica. **50% H<sub>2</sub> – 50% CO, Fr = 0.5-1**, p = 1 bar, T = 300 K..... 69

**Fig 4.23.** Influencia del dosado en la evolución del radio del frente de llama respecto al tiempo, en la bomba cilíndrica. 6.7% H<sub>2</sub> - 93.3% CO, 25% H<sub>2</sub> - 75% CO, 50% H<sub>2</sub> - 50% CO, **Fr = 0.5 - 1**, p = 1 bar, T = 300 K. .... 70

**Fig 4.24.** Influencia del dosado en la evolución de la velocidad de propagación del frente de llama respecto al radio del mismo, en la bomba cilíndrica. 6.7% H<sub>2</sub> - 93.3% CO, 25% H<sub>2</sub> - 75% CO, 50% H<sub>2</sub> - 50% CO, **Fr = 0.5 - 1**, p = 1 bar, T = 300 K. .... 70

**Fig 4.25.** Influencia del dosado en la evolución de la velocidad de propagación del frente de llama respecto a la tasa de stretch, en la bomba cilíndrica. 6.7% H<sub>2</sub> - 93.3% CO, 25% H<sub>2</sub> - 75% CO, 50% H<sub>2</sub> - 50% CO, **Fr = 0.5 - 1**, p = 1 bar, T = 300 K. .... 71

**Fig 4.26.** Influencia del dosado en la velocidad de propagación de la llama sin stretch, en la bomba cilíndrica. 6.7% H<sub>2</sub> - 93.3% CO, 25% H<sub>2</sub> - 75% CO, 50% H<sub>2</sub> - 50% CO, **Fr = 0.5 - 1**, p = 1 bar, T = 300 K..... 72

- Fig 4.27.** Influencia del dosado en la velocidad de combustión laminar, en la bomba cilíndrica. 6.7% H<sub>2</sub> - 93.3% CO, 25% H<sub>2</sub> - 75% CO, 50% H<sub>2</sub> - 50% CO, **Fr = 0.5 - 1**, p = 1 bar, T = 300 K. .... 72
- Fig 4.28.** Comparación entre la evolución de la presión respecto al tiempo en las bombas esférica y cilíndrica, para diferentes composiciones de la mezcla. **%H<sub>2</sub> = 0, 6.7, 25, 50 y 100%**, Fr = 1, p = 1 bar, T = 300 K..... 73
- Fig 4.29.** Comparación entre la velocidad de combustión laminar en la bomba esférica (C<sub>c</sub>) y en la bomba cilíndrica (*u<sub>l0</sub>*), para diferentes composiciones de la mezcla. **%H<sub>2</sub> = 0, 6.7, 25, 50 y 100%**, Fr = 1, p = 1 bar, T = 300 K. .... 74
- Fig 4.30.** Comparación entre la evolución de la presión respecto al tiempo en las bombas esférica y cilíndrica, para diferentes dosados. 6.7% H<sub>2</sub> - 93.3% CO, 25% H<sub>2</sub> - 75% CO, 50% H<sub>2</sub> - 50% CO, **Fr = 0.5 - 1**, p = 1 bar, T = 300 K. .... 75
- Fig 4.31.** Comparación entre la velocidad de combustión laminar en la bomba esférica (C<sub>c</sub>) y en la bomba cilíndrica (*u<sub>l0</sub>*) para diferentes dosados. 6.7% H<sub>2</sub> - 93.3% CO, 25% H<sub>2</sub> - 75% CO, 50% H<sub>2</sub> - 50% CO, **Fr = 0.5 - 1**, p = 1 bar, T = 300 K. .... 76
- Fig 4.32.** Comparación con los datos de la bibliografía de la velocidad de combustión laminar en la bomba esférica (C<sub>c</sub>) y en la bomba cilíndrica (*u<sub>l0</sub>*), frente al dosado. **6.7% H<sub>2</sub> – 93.3% CO, 25% H<sub>2</sub> – 75% CO, 50% H<sub>2</sub> – 50% CO**, Fr = 0.5-1, p = 1 bar, T = 300 K..... 77

# 1. INTRODUCCIÓN

---

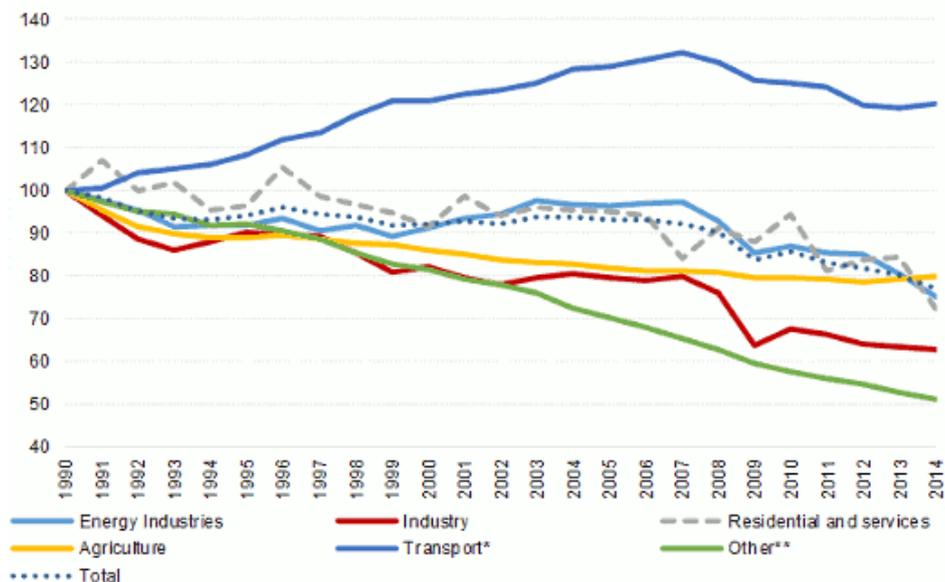


## 1.1. Introducción

A finales del año pasado, una noticia ha resonado sobre el resto, “España pretende prohibir las matriculaciones de coches diésel, gasolina e híbridos a partir de 2040” [1]. El objetivo de esta medida pretendía ser que, para el año 2050, los únicos vehículos que circulen por las carreteras españolas sean aquellos movidos por tecnologías eléctricas o de pila de combustible de hidrógeno, con el fin de conseguir la *descarbonización* total del transporte en las ciudades.

Tal ha sido el revuelo generado, tanto en el sector del automóvil como en la propia ciudadanía, que el mismo Gobierno ha tenido que recular escasos meses después, mediante unas declaraciones de la Ministra de Industria, Reyes Maroto, en las que afirma que “Los motores de combustión todavía tienen mucho que decir” [2].

Es cierto que la situación del sector del transporte es preocupante, al menos en lo que a la contaminación atmosférica generada se refiere. El transporte representa casi una cuarta parte de las emisiones de gases de efecto invernadero en Europa, siendo la principal causa de la contaminación del aire de las ciudades [3]. Además, este sector no ha experimentado la misma disminución gradual de las emisiones que se ha producido en otros, como se puede observar en la *Fig 1.1*.



*Fig 1.1. Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero de los principales sectores, en los últimos años [3].*

Dentro de este sector, el transporte por carretera es, con diferencia, el mayor emisor, ya que representa más del 70% de todas las emisiones de gases de efecto invernadero del mismo [3].

Por lo tanto, si a largo plazo se pretende conseguir el objetivo de eliminar las emisiones con base de carbono, es decir, la *descarbonización*, no hay cabida para las prohibiciones a los vehículos de combustión. En su lugar, se han de promover aquellas tecnologías que propicien una disminución paulatina de estas emisiones, en línea con los reglamentos dictados por la Unión Europea. Tal es el caso del Reglamento (UE) 2019/631 [4], que establece los nuevos estándares de emisiones de CO<sub>2</sub> para automóviles y vehículos comerciales ligeros, el cual entrará en vigor a partir del 1 de enero de 2020.

Lograr esta transición será posible únicamente si, en primer lugar, se concientiza a la población, entre la que se ha de promover el uso del transporte público. Además, será necesaria la evolución de los sistemas de combustión de los motores de los propios vehículos, haciendo que sean más eficientes en el consumo de combustible y en la reducción de las emisiones contaminantes. Por último, y muy importante, será el desarrollo de nuevos combustibles alternativos, con características fisicoquímicas superiores a las de los combustibles utilizados tradicionalmente, como la gasolina o el diésel.

A raíz de esta idea, ha surgido la motivación para realizar del presente Trabajo Fin de Máster, centrado en caracterizar el proceso de combustión de mezclas de gas de síntesis, un combustible gaseoso alternativo (mezcla  $H_2$ -CO) con un gran potencial para la reducción de las emisiones contaminantes. Además, debido a que se obtiene mediante la conversión termoquímica de biomasa, permitirá reducir la dependencia de los combustibles de origen fósil, cuyas reservas son limitadas.

Para la materialización de este trabajo, ha sido necesaria una intensa labor de investigación acerca de los diferentes combustibles alternativos, así como del proceso de combustión de los mismos. Una vez conocidas las bases del proceso, se ha realizado la experimentación de mezclas de gas de síntesis en dos bombas de combustión a volumen constante, una con geometría esférica y otra cilíndrica. Variando las composiciones de la mezcla y el dosado, se ha conseguido comprobar la influencia, tanto de estos parámetros como de la bomba en la que se han ensayado, que presentan en el proceso de combustión, ayudando así a conocer más en profundidad esta temática.

A lo largo de los diferentes apartados que componen este proyecto, se explicarán los objetivos y la justificación que han llevado a su realización, el alcance del mismo, una revisión del estado del arte y su situación actual, la metodología experimental desarrollada y los resultados obtenidos de dicha experimentación. Finalmente, se incluirán tanto las conclusiones como las principales aportaciones extraídas del estudio, así como las posibles futuras líneas de investigación relacionadas.

## 1.2. Antecedentes y justificación

A lo largo de los últimos años, ha habido una gran diversidad de líneas de investigación enfocadas a los combustibles gaseosos alternativos para su utilización en motores de combustión interna. Se han estudiado tanto las características del proceso de combustión como las prestaciones y emisiones de los combustibles más destacados, como el hidrógeno, el gas natural o el biogás. Del gas de síntesis, objeto del presente trabajo, existen también diversas publicaciones, pero dada su importancia, consecuencia del potencial que presenta como uno de los combustibles del futuro, se ha decidido profundizar más en el conocimiento del mismo.

En cuanto al Grupo de Investigación del Departamento de Motores y Máquinas Térmicas, ya se había investigado y experimentado con diversas mezclas combustibles gaseosas, como el hidrógeno [5], [6] o el metano [5], [7]. Dado que no se había analizado el comportamiento del gas de síntesis, ha sido un aliciente adicional para tratar de comprender mejor las características de este combustible.

De las instalaciones experimentales empleadas en este Grupo e Investigación, destacan dos bombas de combustión de volumen constante, una con geometría esférica, y otra cilíndrica, que cuenta con dos accesos ópticos a través de los cuales poder visualizar y grabar, mediante una cámara de alta velocidad y la técnica Schlieren, el proceso de combustión contenido en su interior. Ambas instalaciones han sido utilizadas y probadas en multitud de ocasiones, de forma

independiente. Lo que hasta ahora no se había realizado, era la experimentación paralela en ambas bombas de combustión, por lo que no se conocía con detalle la influencia que tenía en el proceso la utilización de una u otra. Ello ha motivado a que uno de los aspectos centrales de este trabajo haya sido la comparación de los resultados en ambas bombas de combustión, pudiendo así comprobar el efecto que la geometría de la cámara tiene en el desarrollo del proceso.

### 1.3. Objetivos y alcance del trabajo

El objetivo principal de este trabajo fin de máster ha sido el de caracterizar el proceso de combustión de diferentes mezclas  $H_2$ -CO, que representan al gas de síntesis, mediante la experimentación con dos bombas de combustión de volumen constante, con el fin de conocer mejor el comportamiento de dicho combustible, contribuyendo así a su futura aplicación en motores de combustión interna.

Para llevarlo a cabo, será necesaria la consecución de los siguientes aspectos:

- Estudiar, en la bomba esférica, la influencia de la composición de la mezcla combustible y del dosado, sobre parámetros del proceso de combustión obtenidos mediante un modelo de diagnóstico de dos zonas, como la presión o la velocidad de combustión.
- Analizar, nuevamente, el efecto de la composición de la mezcla y del dosado, en este caso en la bomba cilíndrica, en la presión y la velocidad de combustión, derivadas del tratamiento mediante el mismo modelo de diagnóstico. Adicionalmente, a través del análisis de las imágenes Schlieren del proceso de combustión, se obtendrán las diferentes morfologías de las llamas, la evolución del frente de llama, la velocidad de propagación o la velocidad de combustión laminar.
- Determinar el efecto de la geometría de la bomba de combustión en diferentes parámetros, para lo que será necesaria la comparación de los valores de presión registradas en ambas bombas, así como de las velocidades de combustión, la obtenida con el modelo de diagnóstico en la bomba esférica y mediante el análisis de las imágenes en la cilíndrica.
- Validación de las metodologías experimentales y de los resultados extraídos con las mismas, mediante la comparación de las velocidades de combustión laminares aquí obtenidas con las de diferentes autores de la bibliografía.

Este trabajo se centra en estudiar varias mezclas de gas de síntesis, con diferentes dosados y bajo unas condiciones de presión y temperatura de 1 bar y 300 K, respectivamente. Es por ello que los diferentes parámetros analizados, como la presión instantánea, la morfología y evolución del frente de llama, la velocidad de propagación del mismo o la velocidad de combustión laminar, serán característicos de los experimentos aquí realizados y, proporcionando una idea genérica del comportamiento del combustible, supondrán una base para continuar con la investigación de los mismos para que, algún día, el conocimiento sea el suficiente para poder utilizar este combustible alternativo en los motores de combustión interna alternativos.



## 2. ESTADO DEL ARTE

---



## 2.1. Motores de Combustión Interna Alternativos (MCIA)

Desde que en el año 1876 se sientan las bases, cuando Nicolaus Otto presenta en Alemania la patente *GasMotor*, hasta los motores actuales con los más modernos sistemas de ahorro de combustible y reducción de gases contaminantes, los motores de combustión interna alternativos (MCIA) ya tienen más de un siglo de historia [8].

Un motor de combustión interna alternativo es un dispositivo capaz de transformar la energía química contenida en un combustible en energía mecánica mediante una reacción química de combustión. Éste funciona a partir del volumen variable generado en la cámara de combustión por el movimiento de un pistón guiado en el cilindro y que está unido a la biela, articulada a su vez al cigüeñal, transformando así un movimiento lineal alternativo en el movimiento rotativo necesario para el movimiento del vehículo [9].

De entre los diferentes criterios de clasificación de los MCIA, el más importante es según el inicio del proceso de combustión. Por un lado, se tiene el motor de encendido provocado (MEP), también conocido como motor de explosión, de encendido por chispa o motor Otto. Es el tradicional motor de gasolina, y en éste se inicia la combustión de una mezcla homogénea de aire y combustible mediante una chispa que se hace saltar entre los dos electrodos de una bujía. Como consecuencia de lo anterior, el proceso de combustión se produce por el avance de un frente de llama que recorre la cámara de combustión, partiendo desde la bujía y separando en dos zonas, una con mezcla fresca y otra con gases quemados. Por otra parte, está el motor de encendido por compresión (MEC), tradicionalmente conocido como motor Diésel, un honor al ingeniero alemán que lo inventó. En este caso, la combustión se produce por el autoencendido de una mezcla que se va formando al inyectar combustible sobre el aire previamente comprimido.

Atendiendo al tipo de combustible, la característica más relevante es la resistencia del combustible al autoencendido, que debe ser alta en los MEP (para que no se produzca el autoencendido, con efectos gravemente perjudiciales para el motor) y muy baja en los MEC (para que el proceso de combustión se inicie con facilidad). Para medir esta propiedad, se utiliza el índice de octano en los combustibles para MEP y el índice de cetano en los combustibles para MEC, siendo interesante en ambos casos que el índice sea elevado. Es además muy importante en los MEC la viscosidad del combustible, por su influencia en el sistema de inyección. Por ello, los combustibles más adaptados a los motores de encendido por compresión son todos ellos líquidos: gasóleo, fuel-oil y aceites vegetales. Para el caso de los motores de encendido provocado, los combustibles líquidos más interesantes son la gasolina y los alcoholes, mientras que los principales combustibles gaseosos son el gas natural (GN), gases licuados de petróleo (GLP) y el hidrógeno ( $H_2$ ) [10].

Dado que los MEP son los que pueden funcionar con combustibles gaseosos, serán aquellos a los que irá orientado el presente trabajo, de experimentación de mezclas combustibles de  $H_2$ -CO en una cámara de combustión de volumen constante y encendido por chispa.

Los motores de combustión interna presentan gran cantidad de ventajas respecto a otro tipo de motores, aunque también tienen ciertos inconvenientes que los inhabilitan para ciertas aplicaciones. Unos buenos rendimientos, de hasta el 55% en ciertas condiciones; su amplio rango de potencias, desde unos pocos Watios a decenas de Megawatios; y la posibilidad de utilizar combustibles de diferente naturaleza, han convertido a los MCIA en claros dominadores en un amplio campo de aplicaciones, entre las que destacan los vehículos de pasajeros, comerciales, generación de potencia y otros ámbitos de la industria.

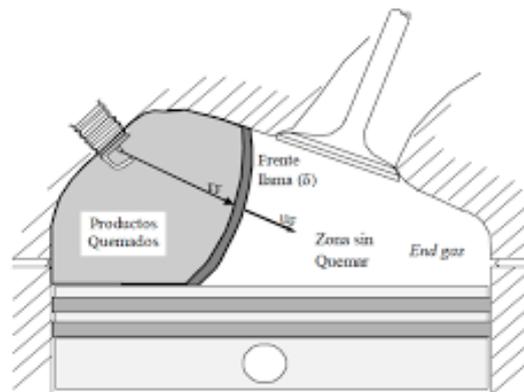
Aun así, tienen ciertas desventajas que pueden limitar su uso, e incluso hacerlos desaparecer. La limitación de potencia máxima, crucial en centrales eléctricas, han hecho que el MCIA sea desplazado por las turbinas hidráulicas y térmicas; en aplicaciones de transporte a alta velocidad, como la aviación, las turbinas de gas han sustituido al MCIA por su mayor potencia específica. Como consecuencia de la dependencia del petróleo para la obtención de combustibles, los motores tradicionales serán modificados para su funcionamiento con combustibles alternativos no derivados del mismo. Finalmente, debido al endurecimiento de las normativas anticontaminación, los MCIA desaparecerán, especialmente en automoción, en pro de los motores eléctricos. A pesar de estos impedimentos, y hasta que se desarrollen las tecnologías sustitutivas, el motor de combustión interna todavía tiene un importante recorrido, con el objetivo de lograr un proceso paulatino de descarbonización y continuar satisfaciendo las necesidades de la industria y del transporte.

## 2.2. Combustión en MEP

### 2.2.1. Combustión normal

El proceso de combustión en un MEP, como ya se ha comentado, se inicia tras una chispa eléctrica en el seno de una mezcla combustible, en el interior de la cámara de combustión del motor. En el proceso de combustión se diferencian tres fases, según Tinaut y López [11].

En una primera fase, la mezcla se comienza a quemar en el punto donde salta la chispa, y dicho volumen de masa quemada se va propagando, inicialmente poco a poco, hacia el resto de mezcla fresca que lo envuelve. Con el transcurso del tiempo, el tamaño de la masa quemada empieza a ser importante, y su efecto comienza a percibirse en la presión que se registra en el interior de la cámara de combustión.



*Fig 2.1. Avance del frente de llama en un MEP [11].*

A partir de ese instante, da comienzo la segunda fase de la combustión. Ésta se caracteriza por una combustión mucho más rápida, debido al efecto combinado de una mayor superficie del frente de llama, mayores temperaturas en la mezcla fresca y al incremento de la velocidad de combustión, de modo que la presión aumenta de forma muy sensible. Es en esta fase en la que se quema la mayor parte de la mezcla, y finaliza cuando el frente de llama se acerca a las paredes de la cámara de combustión, haciendo que se ralentice su propagación.

Desde este momento, se da la tercera y última fase, en la que disminuye la velocidad hasta finalizar la combustión.

En cuanto al análisis del proceso de combustión, son dos las magnitudes intensivas que caracterizan el fluido de trabajo en el interior de la cámara de combustión, la presión y la temperatura. Debido a que durante la combustión coexisten dos regiones, la de mezcla fresca y

la de gases quemados, la temperatura no es uniforme en la cámara, razón por la cual no tiene mucho sentido el pretender medirla. Por otra parte, debido a la evolución tan rápida que experimenta la temperatura durante la combustión, resulta muy complicado poder diseñar un captador que sea capaz de registrarla. Por ambos motivos, la magnitud que experimentalmente se mide es la presión, cuya evolución sí que es factible registrar. En la práctica, y en la realización de los ensayos del presente trabajo, se ha utilizado un captador piezoeléctrico.

### 2.2.2. Combustión anormal

Existen determinadas condiciones en las que pueden aparecer algunas anomalías en el proceso de combustión, que pueden conllevar peligros importantes para el motor. De los diversos procesos de combustión anormales que pueden darse en la práctica, los dos fenómenos más importantes son la combustión con autoinflamación y el encendido superficial [12].

#### 2.2.2.1. Autoinflamación

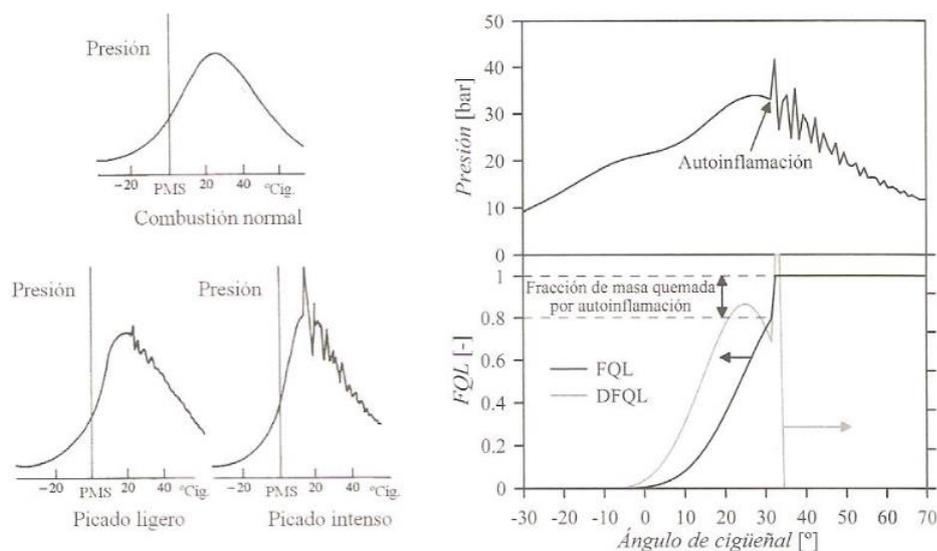
De los dos fenómenos de combustión anómalos que principalmente pueden darse en un MEP, el más importante es la combustión con autoinflamación o autoencendido, y es tal su peligrosidad que, uno de los principales objetivos en el diseño de la cámara de combustión en los MEP es, precisamente, evitar su aparición.

La combustión con autoinflamación tiene lugar cuando parte de la mezcla fresca se autoinflama, antes de que llegue a ella el frente de llama. Generalmente, ocurre en la fracción final de la mezcla, que se corresponde con la zona más alejada de la bujía (*end gas*, en la Fig 2.1).

Asociados a este fenómeno, se producen incrementos de presión en determinados puntos de la cámara de combustión que, a su vez, incrementan la presión y la temperatura en el resto de la mezcla fresca, con lo que la tasa de masa quemada se incrementa considerablemente, en un proceso que se realimenta positivamente, y que es catastrófico para el motor.

Las principales y más perjudiciales consecuencias del autoencendido de la parte final de la mezcla en un MEP son las siguientes:

- La aparición de un incremento repentino de la presión y temperatura en la región que autoenciende, originando una onda de presión que se propaga violentamente, a la velocidad del sonido, a lo largo de la cámara de combustión.



**Fig 2.2.** Efecto del autoencendido sobre la curva de presión (izquierda) y la fracción de calor liberado (derecha) [11].

- Dicha onda de presión genera un ruido muy característico, conocido como *picado* de biela o *knock*. Este ruido, acompañado de un elevado gradiente de presiones, castiga mecánicamente al motor. En la *Fig 2.2* puede apreciarse el efecto del autoencendido en el incremento de presiones, que será más acusado cuanto mayor sea la cantidad de mezcla que sufre autoencendido.
- La otra consecuencia de la onda de presión es que rompe la capa límite térmica que existe en las cercanías de la pared de la cámara de combustión. Dicha rotura provoca que la temperatura del gas del interior de la cámara, que puede llegar a los 2000 K, llegue a la superficie de la pared, causando la fusión del material. En la *Fig 2.3* se puede observar el efecto de la combustión con autoinflamación en la pared de un pistón, que conduce rápidamente a la destrucción del motor.



*Fig 2.3. Efecto del picado sobre un pistón [11].*

Una vez se han comentado las consecuencias y efectos más perjudiciales del autoencendido de la mezcla en un MEP, se van a introducir los principales parámetros de operación que afectan a la aparición o no de este fenómeno.

- *Grado de carga*. Cuanto mayor es, más elevada es la temperatura en el interior de la cámara, lo que aumenta el riesgo de aparición de la combustión con autoinflamación.
- *Régimen de giro*. Al aumentar el régimen de giro del motor, se incrementa la temperatura de la mezcla, ya que existe menos tiempo para que se produzcan pérdidas de calor en la cámara, favoreciendo el autoencendido. Por otra parte, la velocidad de combustión crece proporcionalmente con el régimen de giro, lo que reduce el riesgo de aparición. Dado que el efecto del aumento de la velocidad de combustión es mayor que el del incremento de temperatura, el efecto global de aumentar el régimen de giro disminuye el riesgo de autoencendido.
- *Dosado*. Para el dosado estequiométrico es cuando mayor es el riesgo de autoencendido. Precisamente, en motores fuertemente cargados, una de las estrategias más comunes para reducir el riesgo de autoencendido es la de enriquecer la mezcla, lo que lógicamente implica un aumento del consumo de combustible y de emisiones contaminantes.
- *EGR*. Mediante la adición de gases quemados a la mezcla se consigue disminuir la temperatura en el interior de la cámara, reduciendo así el riesgo de aparición de la combustión con autoinflamación. En motores de gran cilindrada, es más común esta estrategia que la de enriquecer la mezcla, ya que se consigue una reducción significativa del consumo del motor.
- *Avance del encendido*. Incrementando el avance, tanto la presión como la temperatura máxima crecen, aumentando así el riesgo de aparición.
- *Condiciones ambientales*. Una mayor presión y temperatura ambiente, así como una disminución de la humedad, conducen a incrementar el riesgo de autoencendido.

### 2.2.2.2. Encendido superficial

El encendido superficial es el inicio de un frente de llama en algún punto caliente de la cámara de combustión, como pueden ser el electrodo de la bujía, depósitos carbonosos sobre la superficie de la cámara de combustión, o cualquier otro medio distinto de la descarga normal de la chispa. Después del encendido superficial, se desarrolla una llama turbulenta en cada punto en el que se ha producido dicho encendido, y comienza a propagarse a través de la cámara de forma análoga al caso de encendido normal de la chispa [12].

Puede ocurrir antes (pre-encendido) o después (post-encendido) del salto de la chispa. El primero es el más peligroso para la vida útil del motor, ya que se producen grandes incrementos de presión y de temperatura, que a su vez pueden conducir al autoencendido de la mezcla. El post-encendido por su parte, únicamente genera un incremento en el gradiente de presiones.

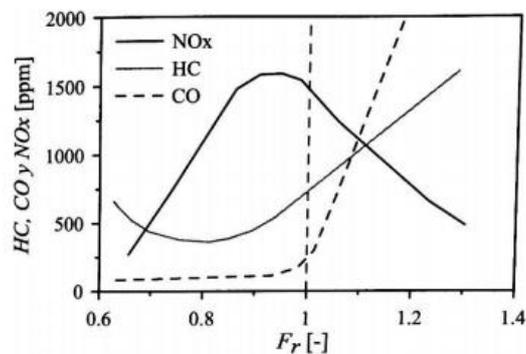
Debido a los efectos gravemente perjudiciales que tienen para la vida del motor, tanto la aparición de la combustión con autoinflamación, como, en menor medida, el encendido superficial, es necesario tenerlos en cuenta a la hora de estudiar y desarrollar un potencial combustible, así como los parámetros de operación del propio motor.

### 2.2.3. Emisiones contaminantes

Debido a que la contaminación química es la que más condiciona el diseño de motores en la actualidad, será la única que se comente en esta revisión del estado del arte. En los MEP, los tres contaminantes principales son el CO, los NO<sub>x</sub> y los HC (hidrocarburos inquemados).

- *CO*. Aparece principalmente en mezclas ricas, en las que la escasez de O<sub>2</sub> impide una conversión completa a CO<sub>2</sub>.
- *NO<sub>x</sub>*. Para su formación son necesarios una elevada temperatura y la existencia de oxígeno. Las temperaturas son máximas para el dosado estequiométrico, mientras que el oxígeno es más abundante cuanto más pobre sea la mezcla. La combinación de ambas condiciones, y por lo tanto la máxima formación de NO<sub>x</sub>, se da para un dosado pobre, cercano al estequiométrico.
- *HC*. Son, al igual que el CO, producto de una combustión incompleta. Ésta se puede dar para dos tipos de dosados: en dosados ricos, en los que no existe suficiente oxígeno para oxidar todo el combustible, permaneciendo una parte de éste si quemar; y en dosados pobres, cercanos al límite de inflamabilidad, de modo que ciertas partes de la mezcla queden sin quemar como consecuencia del posible apagado de la llama.

En la Fig 2.4 se ilustra la evolución de las emisiones contaminantes aquí citadas, en función del dosado.



**Fig 2.4.** Evolución de las emisiones contaminantes en el escape de un MEP en función del dosado de operación [11].

### 2.2.3.1. Sistemas de reducción de emisiones

Ya que actualmente la severidad de la normativa anticontaminante condiciona fuertemente el diseño de los motores, es necesario comentar brevemente los principales métodos empleados en la actualidad para reducir las emisiones contaminantes en los motores de encendido provocado.

Básicamente, se presentan dos estrategias para conseguir reducir las sustancias contaminantes. Por una parte, están las soluciones activas, que tratan de evitar su formación, mientras, las soluciones pasivas las eliminan una vez formadas.

En cuanto a las soluciones activas, como pueden ser el instante de encendido, el dosado de operación, la calidad del combustible, etc. consiguen reducir las emisiones contaminantes hasta cierto punto, que en muchas ocasiones es insuficiente para poder cumplir con la normativa anticontaminación. Es por ello que las soluciones pasivas son las de mayor importancia relativa, y las que se comentarán brevemente a continuación.

En los motores de inyección tradicionales (en el colector), el problema de las emisiones contaminantes se ha superado fundamentalmente gracias al *catalizador de tres vías*, capaz de actuar frente a las tres sustancias contaminantes principales en los motores de encendido provocado, que como ya se han comentado, son el CO, los NO<sub>x</sub> y los HC. Éste es capaz de oxidar el CO y los HC a la vez que reduce los NO<sub>x</sub>, para lo que es necesario que el motor opere con mezcla estequiométrica. Esto implica que el motor no estará optimizado para maximizar el rendimiento, para lo que se requieren dosados ligeramente pobres, ni para maximizar la potencia, para lo que se necesitan dosados ligeramente ricos. Por otra parte, el catalizador de tres vías únicamente funciona cuando ha alcanzado su temperatura de operación. Para reducir el tiempo de puesta en marcha del catalizador y superar este inconveniente, se introducen medidas conocidas como *light-off* del catalizador.

Para el caso de los motores de inyección directa, que en determinadas condiciones trabajan con mezcla estratificada, siendo globalmente pobre, el catalizador de tres vías es capaz de oxidar el monóxido de carbono y los hidrocarburos inquemados, pero no de reducir los óxidos de nitrógeno. Es por ello que la solución más adoptada en este tipo de motores es combinar el catalizador de tres vías, para oxidar CO y HC, con el uso de *EGR* (recirculación de gases de escape), encargado de reducir los NO<sub>x</sub>. Adicionalmente se utilizan *trampas de NO<sub>x</sub>*, capaces de almacenar los óxidos de nitrógeno que no ha podido eliminar el catalizador. Cuando la trampa se satura, es necesario trabajar durante un cierto tiempo con un dosado ligeramente rico, de forma que los NO<sub>x</sub> se liberen y puedan reducirse en el catalizador.

Para finalizar con la presente revisión de la combustión en MEP, destacar, nuevamente, la importancia de los sistemas de reducción y eliminación de emisiones contaminantes, gracias a los cuales es posible cumplir con las exigentes normativas anticontaminantes que rigen en la actualidad. Aun así, estos sistemas de post-tratamiento de emisiones son muy costosos, además de que el sistema en sí mismo será objeto de posibles averías y tendrá necesidades de mantenimiento. Es por ello necesario resaltar la importancia que tiene el desarrollo de nuevos combustibles alternativos, como es el objeto de este trabajo, el Syngas, que ayuden a contribuir con la reducción de la contaminación de las ciudades como consecuencia del transporte, y conseguir progresivamente el objetivo de descarbonización marcados por los gobiernos.

## 2.3. Parámetros de la combustión

### 2.3.1. Velocidad de combustión laminar

En el presente trabajo se presentan dos tipos de velocidades del frente de llama, la velocidad de propagación ( $S_l$ ) y la velocidad de combustión laminar ( $u_l$ ).

La velocidad de propagación es la derivada del radio del frente de llama respecto al tiempo, pudiendo definirse también como la tasa de crecimiento del frente de llama.

$$S_l = \frac{dR}{dt} \quad (2.1)$$

A su vez, la velocidad de propagación equivale a:

$$S_l = u_l + c_{arrastre} \quad (2.2)$$

Siendo  $c_{arrastre}$  la velocidad de arrastre o expansión de los gases quemados, y, como ya se ha mencionado,  $u_l$  es la velocidad de combustión laminar.

Según Lafuente [13], dada una mezcla combustible, gaseosa, premezclada y homogénea, de una composición determinada y para unas condiciones de temperatura y presión, se define la *velocidad de combustión laminar* de dicha mezcla, como la velocidad de propagación, relativa a la mezcla fresca, de un frente de llama unidimensional, plano, adiabático y estable.

Dicha llama laminar unidimensional es ideal, ya que en la práctica no es posible de obtener. Ello es debido a que el frente de llama presenta una cierta curvatura que tiende a deformar y estirar la llama, en un fenómeno conocido como *stretch*, que se comentará con posterioridad. Para diferenciarlas, la velocidad de combustión laminar ideal, o también conocida como sin stretch (unstretched) o sin estirar, se denomina ( $u_l^0$ ). Por su parte, la velocidad de combustión laminar real, deformada o con stretch, se denomina ( $u_l$ ).

En la bibliografía, la velocidad de combustión laminar suele aparecer representada junto a la temperatura de la masa sin quemar, de modo que el punto de corte en la gráfica con la temperatura inicial (unos 300 K para los presentes experimentos), se corresponde con la velocidad de combustión laminar sin estirar en las condiciones iniciales ( $u_l^0$ ).

En el presente trabajo, la velocidad de combustión laminar sin stretch se ha obtenido a partir de dos métodos diferentes. Por una parte, mediante el registro de la presión instantánea en el interior de la cámara de combustión (denominada en el presente trabajo como  $c_c$ ); por otra, mediante el registro óptico de la combustión (denominada como  $u_l^0$ ).

La velocidad de combustión laminar es una propiedad intrínseca de la mezcla, y depende de la composición del gas, la presión y la temperatura [14]. Su análisis es de vital importancia para comprender el proceso de combustión de una mezcla de aire y combustible, ya que características como la estabilidad, la extinción y el apagado de la llama, dependen de la velocidad de combustión laminar [15], [16]. Además, los parámetros generales de la difusividad de la mezcla y la tasa de liberación de calor, están íntimamente relacionados con ésta [17].

También, es fundamentalmente importante para desarrollar y justificar los mecanismos cinéticos químicos de los sistemas de combustión [18], [19], desarrollar los modelos de combustión turbulenta [20], así como para predecir su rendimiento y emisiones [21], [22].

Se han introducido varios métodos para medir la velocidad de combustión laminar: llama de contraflujo, llama cónica, llama plana y llama de expansión esférica. Tanto las llamas

premezcladas (que son las que se producen en motores de encendido provocado), como el estiramiento que pueden experimentar, se ajustan bien a una llama de expansión esférica. Por su parte, las teorías asintóticas y las mediciones experimentales sugieren que existe una relación lineal entre la velocidad de combustión laminar y la tasa de estiramiento  $\kappa$  (como se comentará posteriormente en el apartado de geometría de la llama), de modo que las llamas de expansión esférica han sido ampliamente utilizadas para determinar las velocidades de combustión laminar no estiradas [22].

La velocidad de combustión puede definirse según:

$$c_c = \frac{\dot{m}_q}{\rho_{sq} \cdot A_f} \quad (2.3)$$

Donde  $\dot{m}_q$  es tasa de quemado de combustible,  $\rho_{sq}$  es la densidad de la mezcla sin quemar y  $A_f$  es el área del frente de llama.

También existen diferentes correlaciones empíricas para expresar la velocidad de combustión laminar, entre las que destaca la correlación dada por Metghalchi y Keck [23]:

$$c_c = c_{c,0} \cdot \left( \frac{T_{sq}}{T_{sq,0}} \right)^\alpha \cdot \left( \frac{p}{p_0} \right)^\beta \quad (2.4)$$

Siendo  $c_{c,0}$  la velocidad de combustión laminar en las condiciones de referencia  $T_{sq,0}$  y  $p_0$  (generalmente se consideran 300 K y 1 bar, respectivamente), que depende del tipo de mezcla y del dosado.  $\alpha$  y  $\beta$  son variables que, al igual que  $c_{c,0}$ , también dependen de la mezcla y del dosado. Para los combustibles más habituales,  $\alpha$  toma valores positivos, comprendidos entre 1 y 2. Por su parte,  $\beta$  suele tomar valores negativos, comprendidos entre -0,5 y 0 [15].

Para terminar con el presente apartado, se va a comentar la influencia que tienen los diferentes parámetros sobre la velocidad de combustión. Según Lafuente [13]:

- Cuanto mayor es la temperatura de los reactivos, mayor es la velocidad de combustión laminar. Esto se debe fundamentalmente a un efecto de precalentamiento, que provoca un aumento de la temperatura adiabática de llama. También es favorecida por una mayor temperatura de los reactivos.
- Un aumento de la presión de la mezcla implica una mayor densidad de la misma, lo que conlleva, por un lado, una disminución de la difusividad, y por otro, un aumento del tiempo característico de reacción. Ambas tendencias tienen como consecuencia una disminución de la velocidad de combustión.
- Para la mayoría de los combustibles, la velocidad de combustión es máxima para el dosado estequiométrico, o ligeramente superior, y suelen corresponder con el dosado de máxima temperatura de llama.

### 2.3.2. Inestabilidades del frente de llama: Celularidad

Además de la velocidad de combustión laminar, que como ya se ha comentado es una de las características termofísicas más importantes de las llamas premezcladas, es necesario analizar el inicio y la propagación de las inestabilidades sobre la superficie de la llama, debido, precisamente, a que modifican la velocidad de combustión del frente de llama [24].

La presencia de inestabilidades en un frente de llama liso puede originar el arrugamiento del mismo, hasta alcanzar una estructura conocida como frente de llama *celular*.

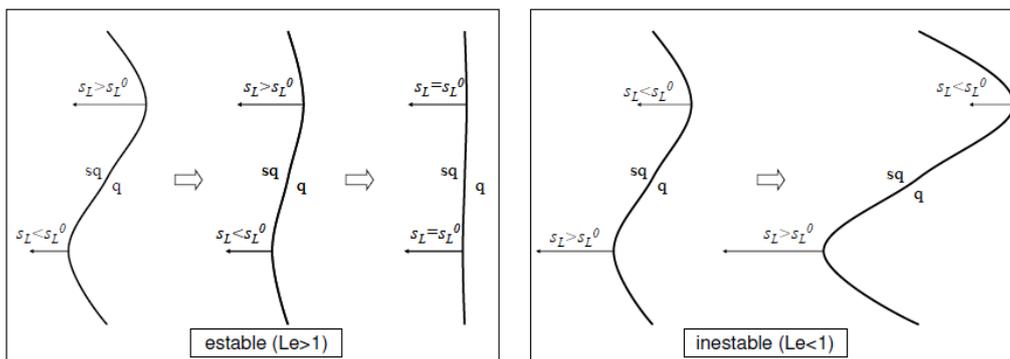
Existen tres fenómenos responsables de dichas inestabilidades: de origen hidrodinámico, de origen termo-difusivo y debido a fuerzas de volumen. Hay que destacar que, a pesar de que cada uno de ellos puede tener un efecto estabilizador o desestabilizador sobre el frente de llama, la estabilidad o inestabilidad de la llama estará determinada por el efecto global de los tres.

Las inestabilidades de origen *hidrodinámico*, son debidas a la expansión térmica que sufren los gases al atravesar el frente de llama. Están asociadas por tanto a la relación de expansión térmica entre gases quemados y mezcla fresca, y al espesor de la llama [24]. A medida que aumenta la presión, se reduce el espesor de la llama, favoreciendo significativamente la propensión a la formación de células.

En cuanto a las inestabilidades de origen *termo-difusivo*, sus efectos tienen que ver con la relación existente entre la difusividad térmica de la mezcla y la difusividad másica del reactivo en defecto de la mezcla. El parámetro adimensional que caracteriza la inestabilidad termo-difusiva es el número de Lewis ( $Le$ ). Precisamente, éste expresa la relación entre la difusividad térmica de la mezcla ( $\alpha$ ) y la difusividad másica del reactivo en defecto ( $D_{def}$ ):

$$Le = \frac{\alpha}{D_{def}} \quad (2.5)$$

Como se observa en la *Fig 2.5*, para mezclas con  $Le > 1$ , el fenómeno termo-difusivo tiene un efecto estabilizador de llama, mientras que para mezclas con  $Le < 1$ , el frente de llama será inestable desde el punto de vista termo-difusivo.

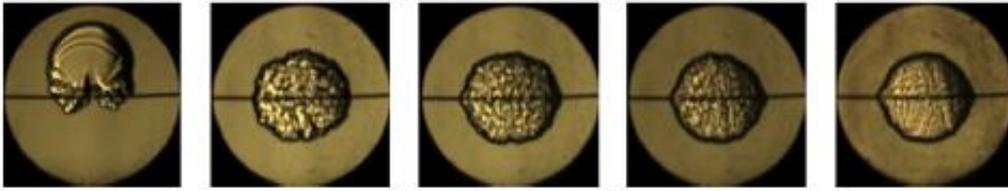


**Fig 2.5.** Evolución temporal de una perturbación del frente de llama en función del  $Le$  [13].

El valor de  $Le$  permanece prácticamente constante a diferentes presiones iniciales, por lo que la inestabilidad termo-difusiva es insensible a las variaciones de presión [25].

El otro tipo de inestabilidad, debido a las *fuerzas de volumen*, es motivado por la diferencia de densidades entre la mezcla fresca y los gases quemados. En el caso de que un fluido más denso (mezcla fresca) esté situado encima de otro fluido menos denso (gases quemados), se produce este fenómeno de flotabilidad. Aun así, este tipo de inestabilidad sólo es evidente cuando la velocidad de combustión laminar es baja.

En la *Fig 2.6* se muestran las imágenes Schlieren de una mezcla de 70%  $H_2$  – 30%  $CO$ , a 3 bares de presión y a temperatura ambiente, y para dosados de 0,3 (izquierda) a 1 (derecha). En ella se puede apreciar el característico aspecto de la inestabilidad por fuerzas de volumen o flotabilidad (imagen de la izquierda, dosado de 0,3), así como las inestabilidades o células, de origen hidrodinámico y/o termo-difusivo.



**Fig 2.6.** Inestabilidad por fuerzas de volumen (izquierda) y de origen hidrodinámico y/o termo-difusivas (resto) [25].

### 2.3.3. Geometría de la llama. Stretch

Ya se ha visto cómo las inestabilidades que aparecen en el frente de llama pueden modificar la velocidad de combustión de la misma. Existe otro factor, en este caso de carácter geométrico, que también puede afectar a la velocidad de combustión de la llama.

Las llamas reales, como ya se ha comentado, no presentan la forma de llama ideal unidimensional. Pueden presentar curvatura, arrugamiento y propagarse en flujos no uniformes, efectos referidos bajo la denominación de *stretch*, expansión o estiramiento, que pueden afectar profundamente a las características de las llamas premezcladas.

Dichas deformaciones experimentadas por la llama y el campo fluido en el que se propaga, se pueden cuantificar mediante la *tasa de stretch*,  $\kappa$ :

$$\kappa = \frac{1}{A} \cdot \frac{dA}{dt} \quad (2.6)$$

Donde A es el área del frente de llama.

De la ecuación 2.6 puede extraerse que, para  $\kappa > 0$ , la llama sufre una expansión o estiramiento, mientras que para  $\kappa < 0$ , la llama experimenta una contracción o compresión.

Para una llama laminar de expansión esférica, la tasa de stretch se define como:

$$\kappa = \frac{2}{R_f} \cdot \frac{dR_f}{dt} = \frac{2}{R_f} \cdot S_l \quad (2.7)$$

Siendo  $R_f$  el radio del frente de llama.

Existe, como se ha mencionado con anterioridad, para el caso de llamas adiabáticas, estables y con bajas tasas de stretch, una relación lineal entre la velocidad de propagación de la llama laminar  $S_l$  y la tasa de stretch  $\kappa$  o estiramiento de la llama [26]:

$$S_l = S_l^0 - L_b \cdot \kappa \quad (2.8)$$

Donde, como ya se han definido anteriormente,  $S_l$  es la velocidad de propagación laminar a una tasa de stretch  $\kappa$ , y  $S_l^0$  es la velocidad de propagación sin stretch. Esta última, al representar la velocidad de propagación laminar frente a la tasa de stretch, equivale a la intersección en el origen ordenadas de ordenadas.

$L_b$  es un parámetro con dimensión de longitud, conocido como longitud de Markstein, que expresa la sensibilidad de la velocidad de combustión con la tasa de stretch.  $L_b$  suele presentar valores del orden del espesor del frente de llama, y depende de parámetros como la energía de activación, el Lewis o el coeficiente de expansión [27].

Un valor positivo de la longitud de Markstein, implica que la velocidad de la llama disminuye con el aumento de la velocidad de estiramiento de la misma, por el contrario, un valor negativo

significa que la velocidad de la llama aumenta con el aumento de la velocidad de estiramiento [25]. Para mezclas H<sub>2</sub>-aire,  $L_b$  disminuye a medida que la mezcla se va haciendo más pobre (disminuye el dosado), pudiendo hacerse negativo para mezclas muy pobres [13]. Para el caso de las mezclas H<sub>2</sub>-CO-aire, que son objeto del presente trabajo, la longitud de Markstein aumenta a medida que la mezcla se hace más rica (aumenta el dosado) [25].

Dicha relación lineal, deja de ser válida para llamas sometidas a altas tasas de stretch, próximas a la extinción, como afirman Sun y Law [28]. Para estos casos, la ecuación 2.8 se expresa alternativamente utilizando los números adimensionales de Karlovitz ( $Ka$ ) y de Markstein ( $Ma$ ), en lugar de  $\kappa$  y  $L_b$ , respectivamente:

$$\frac{S_l^0 - S_l}{S_l^0} = Ma \cdot Ka \quad (2.9)$$

Donde,  $Ma$  es la relación entre la longitud de Markstein ( $L_b$ ) y el espesor del frente de llama ( $\delta_d$ ):

$$Ma = \frac{L_b}{\delta_d} \quad (2.10)$$

Y el  $Ka$ , es la relación entre el tiempo característico de llama ( $\tau_D$ ) y el tiempo hidrodinámico ( $\kappa^{-1}$ ):

$$Ka = \tau_D \cdot \kappa \approx \frac{l_D}{S_l} * \kappa \quad (2.11)$$

En definitiva, el producto de los números  $Ma$  y  $Ka$  representa el déficit en la velocidad de combustión de una llama debido al stretch de la misma [13].

## 2.4. Combustibles

### 2.4.1. Combustibles convencionales

Tradicionalmente los combustibles utilizados en los motores de combustión interna alternativos (MCIA) proceden del petróleo, siendo por tanto de origen fósil. En los motores de encendido provocado (MEP) se utiliza la gasolina, mientras que en los motores de encendido por compresión (MEC), el combustible utilizado es el diésel. Su estado de agregación es líquido, lo que facilita el almacenamiento en condiciones ambientales y, debido a su gran densidad energética, confieren al motor una gran autonomía, con un sistema de alimentación relativamente sencillo. Estas, y otras ventajas más específicas de cada tipo de motor, hacen estos combustibles muy interesantes para su uso en motores de combustión interna alternativos en general, y para su consumo en el sector de la automoción en particular [29].

Desde que fue desarrollado el primer motor de combustión interna, las propiedades de los combustibles han evolucionado debido a diversos factores: los precios del petróleo, el progreso de las tecnologías de procesamiento de las refinerías, el desarrollo de la tecnología de motores, los requisitos de rendimiento y fiabilidad de los vehículos y, más recientemente, las regulaciones ambientales que persiguen reducir el impacto de los gases contaminantes [30].

Precisamente, las limitaciones impuestas por las normativas de emisiones son las que, no solo han obligado a los fabricantes de automóviles a desarrollar sistemas de combustión y postcombustión cada vez más limpios y eficientes, sino que también han empujado a la industria petrolera a reducir sus emisiones con la mejora de sus tecnologías y procesos [29].

## 2.4.2. Combustibles gaseosos alternativos

Los combustibles fósiles son la piedra angular de la industria moderna, siendo además ampliamente utilizados en todos los ámbitos de la vida, lo que los convierte en un elemento vital de la economía mundial. Sin embargo, la naturaleza limitada de las reservas de combustibles fósiles conlleva el agotamiento de las mismas, el encarecimiento de los precios del petróleo y la dependencia energética de los países productores. Además, su combustión tiene un impacto negativo en el medio ambiente y la salud de las personas. Todo ello, unido a las regulaciones ambientales que buscan reducir el impacto de las emisiones contaminantes, hacen necesaria la búsqueda de nuevas energías limpias, así como la mejora de la eficiencia de los procesos de combustión [31].

Una de las soluciones a los problemas anteriores, es el desarrollo de combustibles alternativos, que están adquiriendo cada vez mayor importancia y cuya misión se puede resumir en los siguientes aspectos [32]:

- La sostenibilidad energética mediante el uso extendido de estos combustibles alternativos, derivados de fuentes de energía renovables, reduciendo así tanto la preocupación por las reservas limitadas de combustibles fósiles, como la dependencia de los países productores.
- Mejorar la eficiencia y las emisiones contaminantes de los motores, mediante el uso de combustibles alternativos de propiedades físicas y químicas superiores a las de los combustibles convencionales.
- Reducir el uso desequilibrado de combustibles fósiles basados en el petróleo.

En la actualidad, los combustibles gaseosos se prefieren a los combustibles líquidos y sólidos. La razón fundamental es que las emisiones contaminantes de los dispositivos de combustión operados con combustibles gaseosos se pueden controlar con mayor facilidad, debido a que no contienen impurezas minerales y son más fáciles de quemar, logrando así mayores eficiencias. En cuanto al sistema de alimentación, es menos costoso de producir y operar que el de otros tipos de combustibles [30].

Otras de las ventajas inherentes a los combustibles gaseosos son los niveles extremadamente bajos de contaminantes que presentan, pudiendo ser utilizados de forma eficaz en los MEP. Presentan amplios límites de encendido, lo que permite formar fácilmente mezclas homogéneas que propician una combustión completa. Además, tienen una alta relación hidrógeno/carbono, de modo que producen bajas emisiones con base de carbono, como pueden ser el CO o el CO<sub>2</sub> [33].

Por el contrario, el estado gaseoso de los combustibles implica que la densidad de energía por unidad de volumen, o unidad de masa incluyendo el depósito a presión, sea menor que la de los combustibles líquidos. Esto conlleva que el sistema de almacenamiento requiere de un mayor espacio, que es muy limitado en los automóviles, y de una disminución de la autonomía del propio vehículo [34].

Los combustibles gaseosos más comúnmente utilizados son el gas natural (GN) y el gas licuado de petróleo (GLP). Aun así, los combustibles gaseosos alternativos más interesantes, por ser de origen renovable y/o residual (Renewable and Residual Fuels, FFR), son el hidrógeno (H<sub>2</sub>), el biogás (CH<sub>4</sub>-CO) y el gas de síntesis (H<sub>2</sub>-CO).

#### 2.4.2.1. Hidrógeno

El **hidrógeno (H<sub>2</sub>)** es un gas incoloro, inodoro y no tóxico. Se quema con una llama invisible y sin humo, ya que los productos de su combustión consisten principalmente en agua y algunos óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). Aun así, en los productos de combustión pueden existir trazas de CO, CO<sub>2</sub> e HC como consecuencia de la quema del aceite lubricante.

El número de octano del H<sub>2</sub> (106) es superior al de la gasolina (>95), haciéndolo más adecuado para los MEP, por su mayor índice antidetonante, o lo que es lo mismo, por su mayor resistencia al autoencendido de la mezcla. La velocidad de combustión laminar del H<sub>2</sub> es aproximadamente 10 veces mayor que la de la gasolina o el metano. Esta combustión más rápida, implica menores pérdidas térmicas en el motor, y por tanto un aumento de la eficiencia del mismo [35], [36]. Sus límites de inflamabilidad son muy amplios, del 5 al 75% en volumen, lo que permite trabajar con mezclas pobres.

De las diversas formas de obtención del hidrógeno, la más interesante es mediante la electrólisis del agua utilizando fuentes renovables (solar, eólica, hidráulica), empleando así electricidad libre de contaminación [30].

Este combustible es una opción muy interesante para conseguir el objetivo de descarbonización mundial, dado que su potencial de calentamiento global es insignificante. Sin embargo, el uso de hidrógeno puro en los motores de combustión interna, presenta una serie de dificultades en lo que a seguridad, almacenamiento y economía se refiere. Varias investigaciones, como las de Karim [37] o Verhelst y Sierens [38], comprobaron que al emplear hidrógeno puro se favorecía el autoencendido de la mezcla, especialmente para las cargas más altas del motor. Además, se produce un aumento de las emisiones de NO<sub>x</sub>, como consecuencia de la mayor temperatura de llama.

Es por ello que, la fuerte reactividad y los amplios límites de inflamabilidad, unido a los problemas derivados de la combustión de hidrógeno puro, hacen del hidrógeno un combustible ideal combinar con otros, de combustión más lenta y estrechos rangos de mezcla operacional. Es decir, el hidrógeno se puede definir como un potenciador de la combustión, consiguiendo acelerar significativamente las tasas de propagación de llama, extender el rango de mezcla operativa pobre y reducir así las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Ji y Wang [39], comprobaron cómo el enriquecimiento de gasolina con H<sub>2</sub> en un MEP, puede mejorar el rendimiento y aumentar el par del motor a cargas bajas y bajo régimen de giro. También vieron que los HC disminuyeron, mientras que los NO<sub>x</sub> aumentaban a medida que se incrementaba el enriquecimiento con hidrógeno.

Además, existen numerosos estudios acerca del enriquecimiento de gas natural (GN) con hidrógeno. El GN es una mezcla de diferentes gases, siendo el metano y el hidrógeno sus constituyentes principales. Con la mezcla de ambos combustibles, para mezclas pobres, el rendimiento del motor puede mejorar y las emisiones de CO e HC pueden reducirse aumentando pequeñas cantidades de hidrógeno [40]. En general, las emisiones de CO, CO<sub>2</sub> e HC disminuyen al aumentar el porcentaje de hidrógeno en el GN, por el contrario, las emisiones de NO<sub>x</sub> aumentan debido a la mayor velocidad de combustión, y a su vez al incremento de la temperatura de combustión de la mezcla [41]. Por su parte, Das et al. [42] compararon el rendimiento y las características de combustión de un motor alimentado con H<sub>2</sub> y con Gas Natural Comprimido (GNC), mostrando una mejor eficiencia térmica para el caso del H<sub>2</sub>.

En definitiva, el H<sub>2</sub> tiene un gran potencial como combustible en los MCIA. Sin embargo, existen diferentes obstáculos que a día de hoy impiden su completo desarrollo. Entre ellos destacan la falta de producción, distribución y a la infraestructura de almacenamiento necesario.

#### 2.4.2.2. Biogás

El **biogás** se genera durante la digestión anaerobia de biomasa, en especial de estiércol y otros residuos de origen animal y vegetal, todos ellos renovables y disponibles en el campo, convirtiéndolo así en una fuente de energía excelente en las zonas rurales. Ha sido ampliamente utilizado en calefacción y generación de electricidad, pudiendo también ser empleado en automóviles y transporte urbano [33].

Los recursos de biomasa existentes en nuestro planeta, pueden darnos una idea acerca del potencial global de la producción de biogás. Diferentes expertos llegaron a la conclusión de que de que una parte muy pequeña de dicho potencial era aprovechada, por lo que existe la posibilidad de aumentar significativamente la producción de biogás. La Asociación Europea de Biomasa (AEBIOM) estima que la producción de energía europea basada en la biomasa puede aumentar de los 72 millones de toneladas en 2004 a 220 millones de toneladas en 2020 [43].

En cuanto a la composición del biogás, a pesar de que varía en función de la materia prima utilizada y del proceso de obtención, está constituido aproximadamente por 2/3 partes (en volumen) de  $\text{CH}_4$  y 1/3 partes de  $\text{CO}_2$ , estando presentes otros elementos en cantidades inferiores, como  $\text{H}_2$  o  $\text{N}_2$ . Puede ser utilizado en MCIA mediante la modificación apropiada del motor, siendo adecuado para motores con elevada relación de compresión (MEC) debido a su elevado número de octano. Dado que el contenido de carbono del biogás es inferior al del diésel convencional, las emisiones contaminantes con base de C son inferiores [44]. Su uso en MEC no implica una reducción de potencia, lo que sí ocurre en los MEP, que son muy sensibles a la composición del biogás [45].

Se caracteriza por tener una baja densidad de energía, debido a su alto contenido de  $\text{CO}_2$ . Necesita menos cantidad de aire por unidad de masa para la combustión. Otro aspecto a tener en cuenta es que, debido a los estrechos límites de inflamabilidad que presenta, necesita un estricto control de la relación aire-combustible para mantener un buen rendimiento. Como consecuencia del alto contenido en dióxido de carbono, se disminuye la temperatura de llama durante la combustión, reduciendo así el riesgo de autoencendido de la mezcla, que como ya se ha comentado, es deseable en los MEP. Además, debido al pequeño contenido que puede tener de  $\text{H}_2\text{S}$ , puede producir la corrosión de ciertas partes metálicas de motores y quemadores [45].

En cuanto a los ensayos en motores, Porpatham et al. [46] analizaron el efecto de adicionar, en un MEP, pequeñas cantidades de hidrógeno en el biogás. Comprobaron que se conseguía mejorar la potencia, aumentar la eficiencia y reducir las emisiones de HC.

Además, con el objetivo de conseguir un combustible de mayor calidad para aplicaciones de automoción, el biogás se somete a un proceso de mejora, mediante técnicas denominadas de *upgrading*. Con éstas, se consigue eliminar los diferentes contaminantes, reducir el contenido de dióxido de carbono e incrementar el de metano, desde el 50-75% habitual, hasta más del 95%. Este biogás mejorado, se denomina *biometano*.

Autores como Porpatham et al. [47], estudiaron el efecto de la reducción de  $\text{CO}_2$  contenido en el biogás en el rendimiento, emisiones y parámetros de combustión en un MEP a velocidad constante. Se observó que, para el caso de mezclas pobres, había una reducción en las emisiones de  $\text{CO}_2$  e HC. Además, a raíz de la mejora de la eficiencia térmica, se producía un aumento en las tasas de combustión.

En definitiva, debido a sus diferentes características, el biogás, y más concretamente el biometano, se utiliza típicamente en los motores de encendido por compresión en modo dual de combustible, como es el caso de los ya mencionados autobuses urbanos [33].

### 2.4.2.3. Gas de Síntesis

La gasificación es un proceso de conversión termoquímica, en la que la relación hidrógeno a carbono de la biomasa (materia prima) se incrementa por la ruptura de enlaces de carbono y la adición de hidrógeno para el producto gaseoso. Cuando el combustible gaseoso, con alto contenido en carbono, reacciona con una cantidad controlada de agente gasificante a una temperatura superior a los 600 °C, se forman CO e H<sub>2</sub>. El gas producido se denomina **gas de síntesis** o **syngas**.

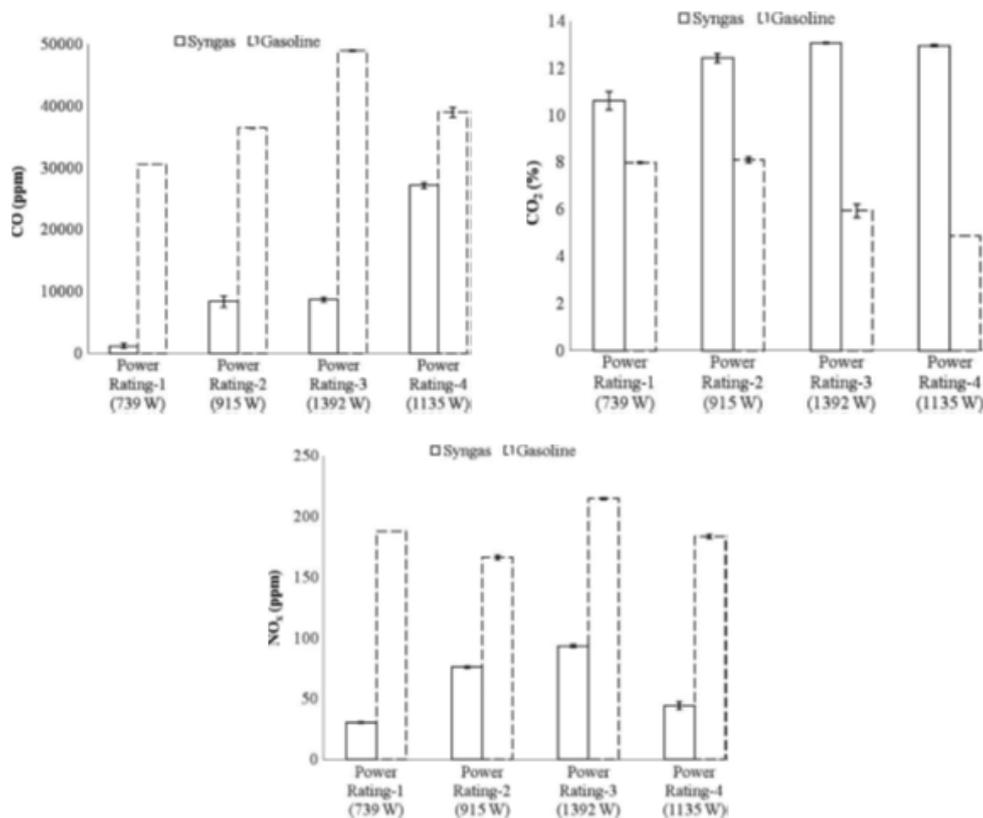
Se compone principalmente de H<sub>2</sub> y CO, en proporciones variables, además de N<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, por lo que lo convierten en un combustible de bajo poder calorífico. Aun así, el efecto del agente gasificante es muy importante en el poder calorífico final del combustible. El gas que se obtiene utilizando aire como agente gasificante se compone de CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> y alquitrán, y tiene un bajo poder calorífico, de entre 4 y 7 MJ/Nm<sup>3</sup>, por lo que también se le conoce como gas pobre. En el caso de utilizar oxígeno o vapor como agente gasificante se obtiene un combustible compuesto de CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y alquitrán, de poder calorífico medio, de entre 10 y 28 MJ/Nm<sup>3</sup>. El coste extra de utilizar oxígeno o vapor como agente gasificante se compensa con un combustible de mejor calidad, denominado gas de síntesis o syngas [48].

El syngas, puede ser utilizado en MEP, con una ligera modificación del mismo. Debido a su bajo poder calorífico (principalmente el obtenido con aire como agente gasificante), en un MEP se presenta una disminución de potencia muy importante, respecto a la gasolina o al gas natural. Esta reducción puede rondar el 40-50%, siendo el 30% debido al menor poder calorífico del combustible, y el resto debido a las pérdidas de presión originadas en las válvulas de admisión.

Son varios los autores que han estudiado el comportamiento del gas de síntesis en motores de encendido provocado. Ji y Wang [39], comprobaron el efecto de adicionar pequeñas cantidades de gas de síntesis a la gasolina en un MEP, manteniendo mezclas pobres. Concluyeron que, al adicionar gas de síntesis, aumentaban tanto la presión máxima del cilindro como la eficiencia térmica del motor. En cuanto a las emisiones, hubo un pequeño incremento de las de CO y NO<sub>x</sub>, así como un incremento de los HC. Posteriormente, Ji et al. [49] realizaron de nuevo el estudio, pero en este caso con un gas de síntesis producido con vapor de agua como agente gasificante. Comprobaron que, al adicionar el nuevo combustible, de mayor calidad, con un aumento de la concentración de H<sub>2</sub> y una disminución del CO, se obtuvo una mayor eficiencia térmica del motor, así como una disminución de los NO<sub>x</sub> y los HC. Por el contrario, al aumentar la concentración de gas de síntesis en la gasolina, se incrementaban las emisiones de CO.

Otras líneas de investigación, tratan de comparar el comportamiento del syngas frente a otros combustibles en un MEP. Hagos et al. [50] investigaron las características de combustión, rendimiento y emisión de un motor de encendido por chispa, de cuatro tiempos e inyección directa, alimentado con gas de síntesis y con Gas Natural Comprimido (GNC). Se observó que, tanto la presión máxima en el cilindro como la tasa de liberación de calor son más altas utilizando gas de síntesis. Aun así, con el GNC se obtuvo una mayor eficiencia térmica y un menor consumo específico de combustible. En cuanto a las emisiones, para las cargas más altas, el gas de síntesis arrojó unos niveles extremadamente bajos CO e HC, mientras que los NO<sub>x</sub> aumentan considerablemente con el nivel de carga. Por su parte, Shah et al. [51] se encargaron de estudiar el rendimiento de un motor de encendido por chispa de aspiración natural, de un solo cilindro y cuatro tiempos, alimentado con syngas. Los resultados obtenidos mediante 100% de gas de síntesis, cuyo valor calorífico inferior era de 5,79 MJ/Nm<sup>3</sup>, fueron comparados con los de la utilización de gasolina. Con el gas de síntesis, se obtuvo una reducción de las emisiones de CO de entre el 30 y el 96%, como consecuencia del alto contenido en carbono y a la mezcla rica de la gasolina. Por el contrario, se produjo un aumento en las emisiones de CO<sub>2</sub> para el

caso del gas de síntesis. Ello es debido a la presencia de dióxido de carbono en el syngas, y a la transformación de monóxido en dióxido de carbono durante la combustión. Las emisiones de  $\text{NO}_x$ , fueron entre un 54 y un 94% más bajas en el caso del motor alimentado con gas de síntesis. En la *Fig 2.7* se pueden apreciar las concentraciones de emisiones para el caso del gas de síntesis y el de la gasolina, obtenidos en dicha investigación.



**Fig 2.7.** Concentraciones de emisiones de  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  y  $\text{NO}_x$  del motor operado con gas de síntesis y gasolina, para diferentes potencias [51].

Además de su aplicación en los motores de combustión interna empleados en los vehículos de transporte, el syngas ha demostrado un gran éxito en la tecnología de Ciclo Combinado de Gasificación Integrada, para producir una energía más limpia y con mayor eficiencia, con un impacto ambiental mínimo. El problema que presentan las turbinas de gas convencionales que queman gas de síntesis, para la generación de potencia, es que utilizan una tecnología de combustión por difusión, que presenta una baja eficiencia y produce unas elevadas emisiones. Con el objetivo de sustituirla, recientemente se ha desarrollado la técnica de combustión premezclada (similar a la que se produce en los MEP) con mezclas pobres. Se ha convertido en una solución prometedora, pero la gran variación existente en la composición del syngas, en especial del contenido en hidrógeno, está dificultando su aplicación. Además, otros gases presentes en el combustible, como el  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y el  $\text{NH}_3$ , tienen efectos negativos en la combustión [52].

Es por ello que, para conseguir abordar estos problemas, es necesario comprender claramente las propiedades de combustión fundamentales del syngas. En el siguiente apartado, se hace una revisión de diferentes investigaciones acerca de la combustión del gas de síntesis. De esta forma, se conocerán sus principales características y se comprobará las líneas de investigación que todavía son necesarias.

### 2.4.3. Investigaciones sobre la combustión del gas de síntesis

Uno de los parámetros más importantes del proceso de combustión, como ya se ha comentado en el apartado correspondiente, es la velocidad de combustión laminar.

Autores como Bouvet et al. [53], Dong et al. [54], Fu et al. [55] o Sun et al. [56], investigaron la velocidad de combustión laminar de llamas de syngas, para mezclas con diferentes proporciones de H<sub>2</sub>-CO, en condiciones atmosféricas. Todos ellos informaron de que la velocidad de combustión aumenta a medida que lo hace la proporción de hidrógeno en la mezcla.

Pocas han sido las investigaciones sobre la velocidad de combustión de estas mezclas a presiones elevadas (hasta 20 bar), destacando las de Sun et al. [56], Sikes et al. [57] y Kéromnès et al. [58]. En estos estudios, en lugar de aire (N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>) como oxidante, se utilizaron O<sub>2</sub> diluido en He, en proporción 1:7. De este modo se consigue reducir la elevada celularidad de las llamas, consecuencia de las elevadas presiones, y así poder medir con facilidad la velocidad de combustión. Todos los estudios reflejan que la velocidad de combustión laminar disminuye con el aumento de la presión de la mezcla.

De entre los también escasos estudios sobre la influencia de la temperatura de precalentamiento de la mezcla en la velocidad de combustión, sobresalen los de Sun et al. [56], Sikes et al. [57] y Kéromnès et al. [58], que alcanzaron temperaturas de entre 300 y 700 K. Todos ellos llegaron a la misma conclusión, y es que la temperatura de precalentamiento de la mezcla aumenta sustancialmente la velocidad de la llama.

También, se ha comprobado el efecto de la dilución de N<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> en el syngas, ya que, en la práctica, son componentes que forman parte del combustible. Prathap et al. [61] y Burbano et al. [62], investigaron la velocidad de combustión laminar de mezclas 50% H<sub>2</sub> - 50% CO diluidas con un 20, 40 y 60% de N<sub>2</sub>, concluyendo que la adición de nitrógeno disminuye de forma sustancial la máxima velocidad de combustión, desplazando este pico hacia mezclas más pobres. Por su parte, Wang et al. [63] se centraron en el efecto de la dilución con diversas proporciones CO<sub>2</sub>. Observaron que la dilución de dióxido de carbono, reduce la velocidad de la llama de forma más intensa que el nitrógeno, debido, entre otros motivos, a la disociación del dióxido de carbono durante la combustión.

Existen, además, investigaciones que analizan la influencia de la energía de ignición en la velocidad de combustión laminar. Estas se centran en encontrar el radio crítico de la llama, es decir, el radio a partir del cual la propagación de la llama no se ve afectada por la energía de la chispa. Bradley et al. [64] y Huang et al. [65] mediante diversos experimentos con hidrógeno y metano, observaron que la energía de ignición no influye en la velocidad de combustión laminar para radios de llama superiores a 6 mm.

Atendiendo a los efectos de estiramiento de la llama, también se encuentran estudios sobre la longitud de Markstein, que como ya se informó, representa la sensibilidad de la velocidad de combustión de la llama a la tasa de stretch de la misma. Bouvet et al. [53] resumieron los datos sobre la longitud de Markstein para mezclas de syngas-aire, a presión atmosférica, de diversos grupos de investigación. Muestran cómo la longitud de Markstein disminuye a medida que aumenta la presión, la temperatura, o se agregan diluyentes (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>) a la mezcla, haciendo en cualquiera de los casos que la llama sea más inestable.

En definitiva, existen muchos grupos de investigación centrados en el proceso de combustión del syngas. Aun así, todavía no existe una base de datos lo suficientemente amplia, que englobe

todas las composiciones o condiciones experimentales posibles, como para conocer con detalle el proceso.

Es por ello, que el presente trabajo va en esa línea. Se va continuar el trabajo de otras investigaciones sobre la caracterización de la combustión del gas de síntesis, ampliando los ensayos y resultados que ya se tienen.

La composición típica del syngas, que es función del proceso de gasificación con el que se ha obtenido, varía, según Chacartegui et al.[66], entre las mostradas a continuación:

- **H<sub>2</sub>**: 6,8 - 50,4%
- **CO**: 8,1 - 60,5%
- **CO<sub>2</sub>**: 1,3 - 29,6%
- **H<sub>2</sub>O**: 0 - 20,4%
- **CH<sub>4</sub>**: 0 - 0,3%
- Trazas de otros contaminantes

En lo que respecta a este trabajo, y para simplificar el estudio, se ha considerado el syngas como una mezcla de H<sub>2</sub> y CO, al igual que ha considerado la gran mayoría de investigadores.

# 3. EXPERIMENTAL

---

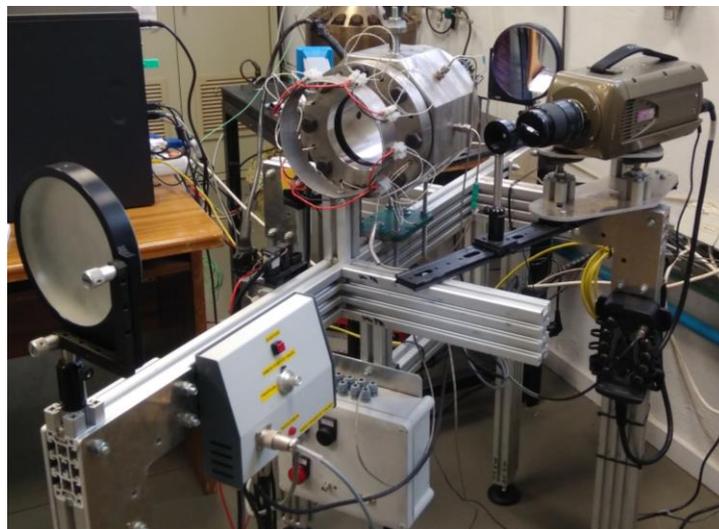


## 3.1. Instalación

Para la realización de los diferentes experimentos objeto del presente trabajo, ha sido necesaria la utilización de dos bombas de combustión a volumen constante (BCVC), ambas ubicadas en el laboratorio del Área de Máquinas y Motores Térmicos del departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica de la Universidad de Valladolid. Mediante la bomba esférica, se registrará la presión durante el proceso de combustión, y posteriormente ésta será tratada para extraer y analizar los diferentes parámetros de interés durante dicho proceso. Con la bomba de combustión cilíndrica, provista de dos accesos ópticos en sus extremos para poder visualizar el proceso de combustión, mediante la técnica Schlieren y una cámara de alta velocidad, se pretende estudiar la morfología de la llama y analizar tanto las inestabilidades de la misma como los parámetros del proceso a partir del análisis de las imágenes. En la bomba cilíndrica, pese a que también se puede registrar la presión durante la combustión, el frente de llama esférico se deforma debido al contacto con las paredes de la propia cámara, resultando unas presiones de combustión inferiores a las que teóricamente deberían darse, como se muestra en el apartado de resultados correspondiente. Es por este motivo por el cual se necesita de la bomba esférica para registrar las presiones, ya que en ésta el frente de llama, también esférico, no se deforma y las presiones obtenidas prácticamente coinciden con las del modelo teórico.

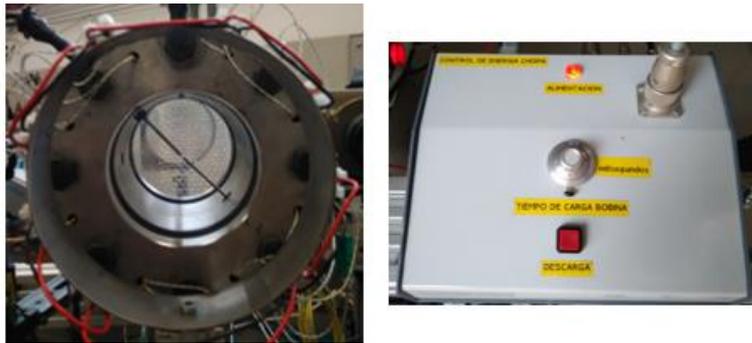
### 3.1.1. Bomba de combustión cilíndrica

La bomba de combustión de volumen constante cilíndrica (BCVCC) es el componente central de la instalación. Como puede observarse en la *Fig 3.1*, tiene geometría cilíndrica y unas dimensiones de 135 mm de largo y 57,15 mm de radio, que la confieren un volumen en su interior de 1,385 L. Está diseñada para soportar presiones durante la combustión de hasta 20 bar y se puede precalentar hasta 400 K.



*Fig 3.1. Bomba de combustión cilíndrica, espejos y cámara de alta velocidad.*

Los extremos de la cámara están sellados mediante dos cristales de sílice fundida (tan resistente como el cuarzo), que permiten visualizar el proceso de combustión que ocurre en su interior. El sistema de ignición se compone de dos electrodos ubicados en la parte interior central de la bomba y una fuente de alimentación externa, los cuales se muestran en la *Fig 3.2*.



**Fig 3.2.** Electrodo del sistema de encendido y fuente de alimentación externa.

Existen, además, un conjunto de elementos de medida y control de los parámetros de interés de la combustión.

Encargados de medir la presión de llenado de la bomba con aire y combustible, hay cuatro transductores piezorresistivos para diferentes rangos de presión (En la Fig 3.3, de derecha a izquierda, 1, 4, 10 y 20 bar).



**Fig 3.3.** Transductores piezorresistivos y válvulas de cierre.

En la propia BCVC, hay instalado un transductor piezoeléctrico para medir la presión instantánea durante el proceso de combustión. El transductor utilizado es un Kistler 7063, tiene un rango de medida de 0 a 200 bar, y soporta temperaturas de hasta 350 K. La señal de este sensor será transmitida a través de un amplificador, también modelo Kistler.



**Fig 3.4.** Transductor piezoeléctrico y amplificador Kistler.

El otro parámetro de mayor importancia es la temperatura en el interior de la bomba. Ésta se controla mediante un PID, que manda la señal a un conjunto de resistencias colocadas en la bomba para alcanzar las temperaturas requeridas durante los experimentos.



**Fig 3.5.** Controlador PID y resistencias.

En lo que respecta a los diferentes gases que pueden ser empleados en los experimentos de combustión, se encuentran almacenados en botellas de alta presión. En el laboratorio se dispone de tres gases combustibles: metano, hidrógeno y monóxido de carbono. Debido a la combustibilidad y peligrosidad de los mismos, por motivos de seguridad se encuentran en el interior de cabinas con ventilación forzada individual (Fig 3.6). También están disponibles gases inertes como son el nitrógeno y el dióxido de carbono, pero para los experimentos desarrollados para el presente trabajo, únicamente se han utilizado el  $H_2$  y el  $CO$ .



**Fig 3.6.** Combustibles en botellas de alta presión y sus medidas de seguridad.

Dado que para que una combustión sea posible, además de combustible es necesario un comburente, para la realización de los experimentos se ha utilizado aire ambiente procedente de la línea de aire comprimido del laboratorio, cuya composición es de un 21% de  $O_2$  y un 79% de  $N_2$ , a una presión máxima de 8 bar. Tanto el combustible como el aire, se hace llegar a la bomba de combustión mediante el sistema de conductos, válvulas y sensores de presión (comentados anteriormente) que se muestra en la Fig 3.7.



**Fig 3.7.** Sistemas de conductos, válvulas y sensores de presión para el suministro de aire y combustible.

Para poder visualizar el proceso de combustión, la instalación presenta un conjunto de dispositivos. En primer lugar, está el sistema de iluminación, que básicamente es un diodo LED de luz blanca, con disipador de calor y lente focalizadora. Esta fuente luminosa emite un haz de luz que llega hasta el primer espejo, donde este haz es reflejado y colimado, de modo que de éste sale un haz de luz paralelo que llega hasta la cámara de combustión. A través de ésta, los gradientes de densidad provocados por el proceso de combustión hacen que, a la salida, el haz de luz tenga características diferentes. Dicho haz modificado a la salida de la cámara es reflejado en el segundo espejo, para posteriormente ser concentrados mediante un diafragma obturador regulable.



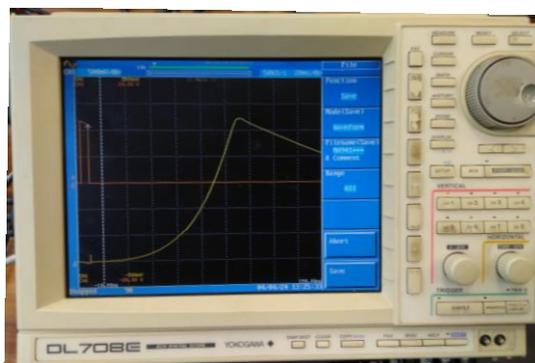
*Fig 3.8. Diodo LED, espejos y diafragma obturador.*

La grabación del proceso de combustión se realiza mediante una videocámara CCD de alta velocidad Phantom v210 a 7000 fps, que presenta una resolución máxima de 1280x800 y una velocidad de captura máxima de 300.000 fps.



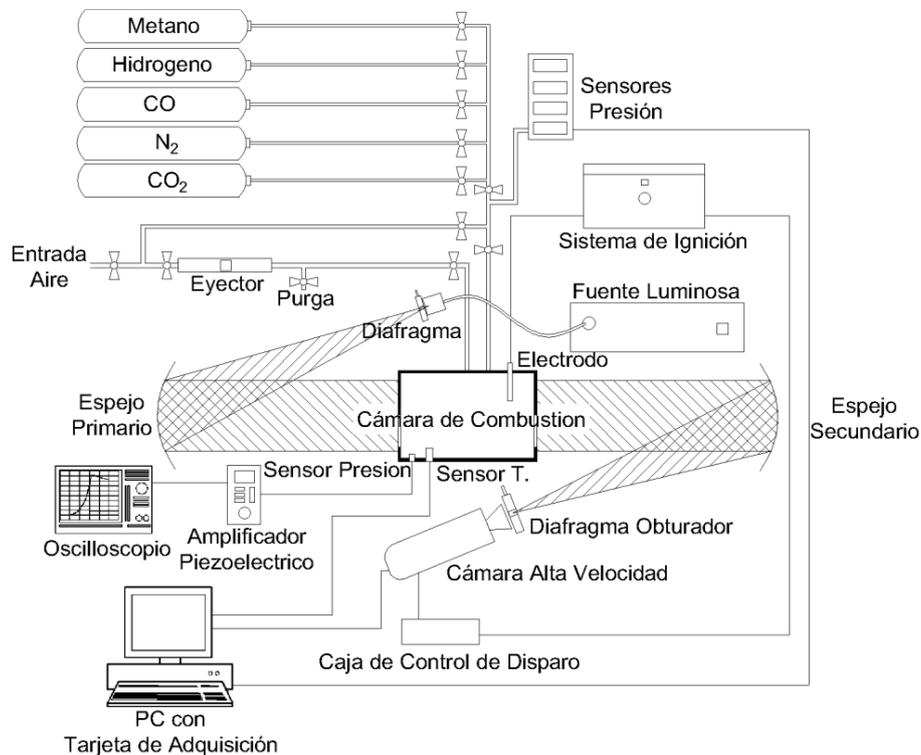
*Fig 3.9. Videocámara de alta velocidad Phantom v210.*

Finalmente, el equipo de adquisición de datos con el que cuenta la instalación es un osciloscopio digital Yokogawa. Mediante tres de sus ocho canales, es posible detectar y visualizar las señales del captador de presión piezoeléctrico, de la chispa entre los electrodos y la señal del trigger.



*Fig 3.10. Osciloscopio digital Yokogawa.*

Una vez se han comentado los elementos que componen la instalación de la BCVC cilíndrica, mediante el esquema de la *Fig 3.11*, se pretende mostrar con mayor claridad el conjunto de la instalación. En ésta se diferencian claramente los elementos que componen los sistemas de combustión, óptico y de adquisición y tratamiento de datos.



**Fig 3.11.** Esquema de la instalación de la BCVC cilíndrica [67].

### 3.1.2. Bomba de combustión esférica

Como ya se ha comentado, con la bomba esférica únicamente se puede realizar el proceso de combustión, sin poder visualizar ni grabar dicho proceso. Es por ello que los elementos que componen la instalación de la BCVC esférica son prácticamente los mismos que para la cilíndrica, a excepción de los componentes relacionados con la visualización y grabación.

El elemento central de la instalación es la bomba de combustión de volumen constante con geometría esférica (BCVCE), que con 100 mm de radio y un volumen de 4,189 L, se muestra en la *Fig 3.12*. Está diseñada para soportar presiones de hasta 200 bar (10 veces más que la cilíndrica) y temperaturas de precalentamiento de hasta 600 K [13]. Como se puede ver en la imagen, la cámara de combustión está en el interior de la carcasa de acero, por lo que no puede visualizarse ésta ni el proceso de combustión que tiene lugar en su interior.



**Fig 3.12.** Bomba de combustión esférica.

El resto de elementos de la instalación necesarios para la realización de la combustión, así como del registro de la presión durante la misma, son similares a los comentados en el apartado anterior. Electrodo y fuente de alimentación para el sistema de ignición; sistema de transductores piezorresistivos, válvulas de cierre y conductos para el llenado con aire y combustible de la bomba (*Fig 3.13*); transductor piezoeléctrico para la medida de la presión durante el proceso de combustión; termopar y PID para la medida y el control de la temperatura en el interior de la bomba; botellas de alta presión para el suministro de combustibles; bomba de vacío para extraer los gases de combustión del interior de la bomba (en la bomba cilíndrica el vaciado se realizaba por efecto Venturi); amplificador y osciloscopio para obtener la presión medida por el piezoeléctrico durante la combustión.



**Fig 3.13.** Sistema de sensores, válvulas y conductos para el llenado de la bomba.

Finalmente, se muestra en la *Fig 3.14*, para mayor claridad, los elementos que componen la instalación de BCVC esférica en su conjunto.



**Fig 3.14.** Instalación completa de la BCVC esférica.

## 3.2. Metodología Experimental

Una vez han sido detalladas las diferentes instalaciones, es necesario seguir una correcta metodología experimental, de modo que la mezcla de combustible y aire en el interior de la bomba sea la especificada.

El procedimiento experimental se compone básicamente de cuatro pasos. En primer lugar, se han de fijar los parámetros de los diferentes experimentos, siendo éstos, el dosado relativo ( $F_r$ ), la presión ( $p_i$ ) y temperatura ( $T_i$ ) iniciales dentro de la cámara, así como la fracción de cada combustible ( $H_2$  y  $CO$ ) en la mezcla. Con los parámetros fijados, se procederá a la preparación de la bomba, o lo que es lo mismo, a su vaciado y limpieza, de modo que no queden productos gaseosos de combustiones anteriores, que pudieran modificar la composición de la mezcla buscada. Durante la etapa de preparación, también se ajustará la temperatura necesaria para cada experimento, mediante el controlador PID mostrado en la instalación experimental. Seguidamente, se realizará el llenado de la bomba con las cantidades de combustible y aire necesarias en cada mezcla. Para finalizar el procedimiento, la mezcla se dejará reposar un tiempo determinado, de forma que, a la hora de realizar la combustión, ésta sea perfectamente homogénea.

A continuación, se detallan, para una mayor claridad, los diferentes aspectos que conforman la metodología experimental.

### 3.2.1. Parámetros experimentales

Dado que uno de los objetivos principales del presente Trabajo Fin de Máster es comprobar la influencia que tiene la variación de las proporciones  $H_2$ - $CO$  de la mezcla combustible, en diferentes parámetros del proceso de combustión, se ha optado por la realización de mezclas con una proporción de **6.7%  $H_2$  – 93.3%  $CO$** , **25%  $H_2$  - 75%  $CO$**  y **50%  $H_2$  - 50%  $CO$** . De esta forma, se ampliará la base de datos experimentales con la que ya contaba el Grupo de Investigación del Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica de la Universidad de Valladolid, con proporciones de 100%  $H_2$  – 0%  $CO$  y 80%  $H_2$  – 20%  $CO$ , obtenidas por Calvete [6]. A su vez, se han realizado mezclas estequiométricas de composición 0%  $H_2$  – 100%  $CO$ , 80%  $H_2$  – 20%  $CO$  y 100%  $H_2$  – 0%  $CO$ . Con éstas se ha perseguido la comprobación de los resultados ya existentes, así como tener, para el caso de dosado estequiométrico, un variado abanico de composiciones que poder estudiar, para analizar el efecto de la concentración de hidrógeno en el gas de síntesis sobre la velocidad de combustión, entre otros parámetros del proceso.

Por otra parte, se ha decidido realizar un barrido de dosados entre **0,5 y 1**. El rango de dosados está acotado inferiormente debido a la dificultad de encendido de mezclas aún más pobres, como consecuencia del importante contenido en monóxido de carbono. Superiormente, no interesan dosados superiores al estequiométrico ( $F_r = 1$ ). Ello es debido a que, uno de los objetivos de este combustible es su futura utilización en motores de combustión interna, en los que no interesan dosados más elevados, que implicarían un aumento del consumo de combustible y de las emisiones contaminantes.

Los experimentos han sido realizados en condiciones ambientales, es decir, bajo presiones de **1 bar** y temperaturas de **300 K**. El motivo principal de esta decisión, es que para estas condiciones existe una amplia bibliografía con la que posteriormente se puede comparar y validar los resultados.

### 3.2.2. Preparación de la BCVC

La limpieza de la bomba consiste en un proceso de venteo y circulación de aire por la misma, para posteriormente realizar varios vaciados. De esta forma se consigue eliminar cualquier producto o residuo de combustiones anteriores que haya podido quedar retenido en el interior cámara, que actuaría como inerte en la siguiente combustión, reduciendo la temperatura de la misma.

En primer lugar, se realiza un venteo y se pasa aire por la bomba, durante al menos dos minutos. Seguidamente, y para el caso de la bomba cilíndrica, se realiza el vaciado mediante un eyector, que por efecto Venturi, consigue generar una depresión en la cámara de hasta 0,080 bar. Para el caso de la bomba esférica, se cuenta con una bomba de vacío acoplada al circuito de aire, con la que se consiguen alcanzar vaciados de hasta 0,005 bar. Pese a que el vacío que se consigue en la bomba cilíndrica es un orden de magnitud superior al obtenido en la esférica, es suficiente para poder asegurar que en el interior de la cámara no hay ningún tipo de gas indeseado.

Este proceso de limpieza de la bomba se repetirá un total de dos veces (2 venteos y 2 circulaciones de aire + 2 vaciados), consiguiendo así que el interior esté exento, con toda seguridad, de cualquier elemento gaseoso que pudiera alterar la realización del experimento.

La etapa de preparación de la bomba, concluye una vez se haya alcanzado la temperatura requerida para cada experimento (300 K), ajustada mediante el controlador PID.

### 3.2.3. Llenado de la BCVC

Como se ha mostrado en el apartado de la instalación, ambas bombas, tanto la esférica como la cilíndrica, cuentan con un panel compuesto de conductos, válvulas y sensores, que permite el paso controlado de combustible y aire hacia el interior de las mismas. Es por ello que, con la instalación disponible, el método más adecuado para realizar el llenado de la bomba es mediante la *ley de presiones parciales* de Dalton.

Dicha ley dice que, la presión parcial de cada uno de los gases es igual a la presión total por la fracción molar de cada uno de ellos. Puesto que la mezcla combustible se compone de monóxido de carbono, hidrógeno y aire, resulta:

$$p_{total} = p_{total} \cdot X_{CO} + p_{total} \cdot X_{H_2} + p_{total} \cdot X_{Aire} \quad (3.1)$$

El llenado de la bomba para la realización de todos y cada uno de los experimentos que conforman el presente trabajo, se ha facilitado mediante la creación de una hoja *Excel* (mostrada en la *Fig 3.15*). En ésta, se introducen como parámetros de entrada: la fracción de monóxido de carbono (%CO), la fracción de hidrógeno (%H<sub>2</sub>), la presión inicial (P<sub>i</sub>), la presión de vacío (P<sub>residual</sub>), la temperatura inicial (T<sub>i</sub>) y el dosado relativo (F<sub>r</sub>). Como parámetros de salida devuelve las presiones parciales de llenado: P<sub>CO</sub>, P<sub>H<sub>2</sub></sub> y P<sub>Aire</sub>.

| Parámetros ENTRADA |                 |                            |                             |                           |                          |                |
|--------------------|-----------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------|
| %CO                | %H <sub>2</sub> | P <sub>inicial</sub> (bar) | P <sub>residual</sub> (bar) | T <sub>inicial</sub> (°C) | T <sub>inicial</sub> (K) | F <sub>r</sub> |
| 50                 | 50              | 1.0                        | 0.008                       | 27                        | 300.15                   | 1              |

| Parámetros SALIDA                |          |                            |
|----------------------------------|----------|----------------------------|
| Presiones                        | ΔP (bar) | P <sub>inicial</sub> (bar) |
| Presidual                        | -        | 0.0080                     |
| <b>P<sub>CO</sub></b>            | 0.1479   | <b>0.156</b>               |
| <b>P<sub>H<sub>2</sub></sub></b> | 0.1479   | <b>0.304</b>               |
| <b>P<sub>Aire</sub></b>          |          | <b>1.000</b>               |

| F <sub>r</sub> | 1      | 0.9    | 0.8    | 0.7    | 0.6    | 0.5    |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| CO             | 0.1479 | 0.1372 | 0.1258 | 0.1136 | 0.1007 | 0.0868 |
| H <sub>2</sub> | 0.1479 | 0.1372 | 0.1258 | 0.1136 | 0.1007 | 0.0868 |
| O <sub>2</sub> | 0.1479 | 0.1524 | 0.1572 | 0.1623 | 0.1678 | 0.1736 |
| N <sub>2</sub> | 0.5562 | 0.5732 | 0.5912 | 0.6104 | 0.6309 | 0.6528 |
| Suma           | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |

**Fig 3.15.** Hoja Excel para el cálculo de presiones de llenado de la BCVC.

Para el proceso de llenado de la bomba, se introducen, en primer lugar, los combustibles gaseosos. En concreto, primero se llena hasta la presión parcial del CO, y cuando el sensor de presión se ha estabilizado, se introduce hasta la presión parcial del H<sub>2</sub>. Una vez introducidos los combustibles, se introduce aire procedente de la línea de aire comprimido de la Universidad, hasta alcanzar la presión inicial requerida para cada experimento, de 1 bar.

Es de vital importancia la introducción de las cantidades exactas de aire y combustible, de modo que los parámetros del experimento sean los realmente buscados.

Este procedimiento es posible gracias a un juego de apertura y cierre de válvulas existentes en la instalación.

### 3.2.4. Homogeneización de la mezcla

Una vez la mezcla está en el interior de la bomba, en las condiciones de presión y temperatura indicadas, y previamente al encendido de la chispa, se dejará transcurrir un tiempo, denominado *tiempo de mezcla*, para conseguir la correcta homogeneización de la misma.

El tiempo de mezcla empleado en los experimentos ha sido de **3 minutos**, ya que, como comprobó Lafuente [13], es el mínimo tiempo que asegura una mezcla completamente homogénea.

Durante la espera del tiempo de mezcla, es recomendable comprobar que los aparatos de adquisición y tratamiento de datos funcionan correctamente: chispa, osciloscopio, amplificador y, para el caso de la bomba cilíndrica, también el registro del vídeo en el ordenador.

### 3.2.5. Combustión

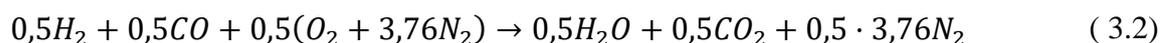
Una vez ha transcurrido el tiempo de mezcla, se puede iniciar la combustión. Para ello se hace saltar una chispa en el centro geométrico de la bomba, lo que provoca que un frente de llama esférico evolucione comprimiendo la mezcla fresca, hasta que choca con las paredes de la bomba, finalizando así la combustión.

Independientemente de que se vayan a realizar más experimentos o no, una vez se produce la combustión se ha de abrir el venteo, de modo que se vayan expulsando los productos de la combustión. En caso de que se vayan a realizar experimentos posteriores, se iniciará de nuevo el proceso de preparación de la bomba: venteo, circulación de aire, vacío, etc.

### 3.2.6. Adquisición de datos

En el mismo instante que salta la chispa, el trigger, conectado al osciloscopio, registra la evolución temporal de la presión debida a la combustión. La curva obtenida en el osciloscopio, voltaje-tiempo, se carga en un programa realizado en LabVIEW. En éste, se introducen los parámetros del experimento: presión, temperatura, bar/V del amplificador, radio de la bomba, así como las fracciones molares del combustible ( $Y_{CO}$ ,  $Y_{H_2}$ ) y del aire ( $Y_{N_2}$ ,  $Y_{O_2}$ ).

Para conocer dichas composiciones, se parte, a modo de ejemplo, de la reacción de combustión de la mezcla 50% H<sub>2</sub> – 50% CO y aire:



De modo que, la fracción molar de cada uno de los reactivos (H<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>), para los diferentes dosados, resulta:

$$Y_{H_2} = \frac{0,5H_2 \cdot F_r}{(0,5H_2 + 0,5CO) \cdot F_r + 0,5(O_2 + 3,76N_2)} \quad (3.3)$$

$$Y_{CO} = \frac{0,5CO \cdot F_r}{(0,5H_2 + 0,5CO) \cdot F_r + 0,5(O_2 + 3,76N_2)} \quad (3.4)$$

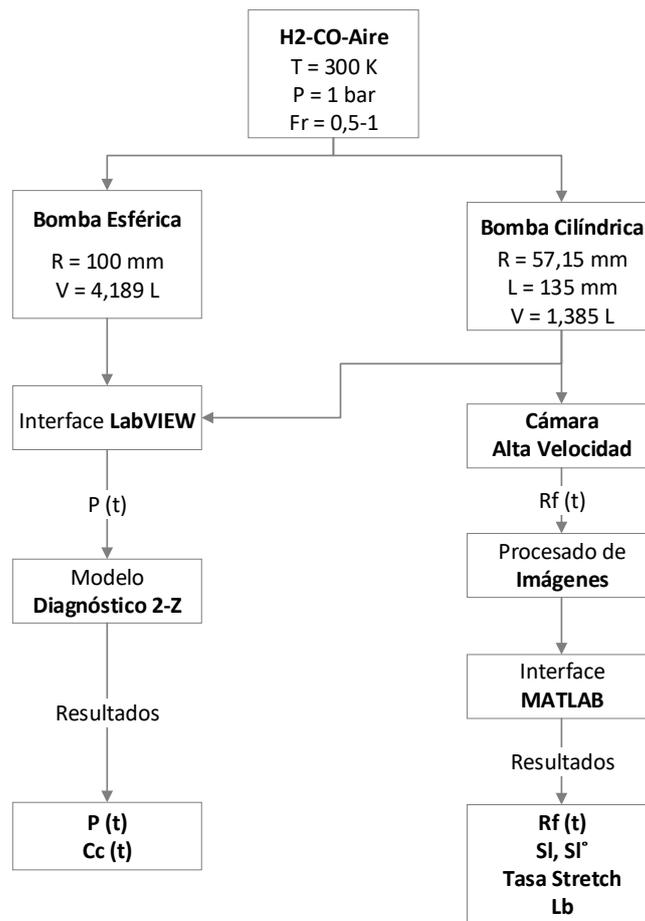
$$Y_{O_2} = \frac{0,5O_2}{(0,5H_2 + 0,5CO) \cdot F_r + 0,5(O_2 + 3,76N_2)} \quad (3.5)$$

$$Y_{N_2} = \frac{(0,5 \cdot 3,76)N_2}{(0,5H_2 + 0,5CO) \cdot F_r + 0,5(O_2 + 3,76N_2)} \quad (3.6)$$

Con todos los parámetros introducidos en el programa de LabVIEW, éste obtiene, entre otra información, la evolución temporal de la presión, en forma de curva P-t. Finalmente, pasando los datos de p (t) por un modelo de diagnóstico de dos zonas, se obtienen todos los parámetros de interés de la combustión.

Como ya se comentó en el apartado de la instalación experimental, tanto la bomba esférica como la cilíndrica permiten el registro y adquisición de la evolución de la presión con el tiempo. Por su parte, la bomba cilíndrica permite, además, la visualización de la combustión mediante la técnica Schlieren, así como el diagnóstico óptico mediante un procesamiento de las imágenes.

En la Fig 3.16, se muestra de forma esquemática las diferentes entradas y salidas para ambos métodos de adquisición de datos.



**Fig 3.16.** Adquisición de datos y tratamiento de los resultados de los experimentos. Adaptada de Pérez [7].

### 3.3. Tratamiento de datos

#### 3.3.1. Modelo de Diagnóstico de Dos Zonas

El tratamiento de los datos obtenidos durante la combustión, se realiza mediante un modelo de diagnóstico de dos zonas (mezcla fresca y mezcla quemada). Éste se basa en la aplicación de las ecuaciones de conservación termodinámicas y, teniendo como entrada el registro experimental de la evolución temporal de la presión durante la combustión en la BCVC, tanto en la esférica como en la cilíndrica, se determinan, entre otros parámetros, la velocidad de combustión, la fracción de calor liberado, las fracciones de masa quemadas o la temperatura en cada una de las zonas.

##### 3.3.1.1. Hipótesis del modelo

El modelo de dos zonas descrito, se asienta sobre una serie de hipótesis, las cuales se citan a continuación [13]:

- El frente de llama es una superficie esférica, sin espesor, que separa las dos zonas, de mezcla sin quemar o fresca y de mezcla quemada. Dicho frente de llama se genera en el centro geométrico de la bomba y evoluciona aumentando de radio, permaneciendo concéntrico con la cámara de combustión.
- En cada una de las zonas se consideran uniformes la temperatura, composición química y resto de propiedades intensivas. Mientras que la composición de la zona de mezcla fresca es constante, la de la zona de mezcla quemada evoluciona en el tiempo.
- Se supone que la presión es uniforme e igual en ambas zonas.
- En cada zona, se utiliza la ec. de los gases ideales como ec. térmica de estado.
- Ambas zonas se consideran adiabáticas, por lo que no existe transmisión de calor entre las zonas ni con la pared de la bomba.
- El único flujo másico que se considera es ligado al proceso de combustión, denominado *flujo de combustión* ( $\dot{m}_{sq \rightarrow q}$ ), que transfiere masa desde la zona fresca hacia la zona quemada.

La hipótesis de frente de llama esférico implica que, conocido el volumen de la zona quemada y la posición de la bujía, se puede obtener la posición del frente de llama. Se ha de tener constancia de que, a pesar de que esta hipótesis es la más comúnmente empleada en este tipo de modelos, la forma del frente de llama no siempre es esférica. Dicho frente puede verse deformado en condiciones de combustión premezclada como consecuencia del flujo existente dentro de la cámara, del gradiente de temperatura existente, especialmente en las cercanías de la pared, o de la imposibilidad de expandirse en las cercanías de la pared [68]. Este último fenómeno es, precisamente, el responsable de que en la BCVC cilíndrica, por la geometría de la cámara de combustión, se produzca la deformación del frente de llama esférico. A causa de ello, la presión obtenida durante la combustión en la cámara cilíndrica es inferior a la presión teórica del proceso y a la obtenida en la bomba de combustión esférica, que se supone ideal. Esta afirmación, se confirmará en el apartado de resultados, concretamente en la comparación entre las bombas esférica y cilíndrica.

##### 3.3.1.2. Ecuaciones

Cada una de las zonas del modelo se comporta como un sistema abierto, de forma que su energía interna varía como consecuencia del aporte de calor, trabajo y entalpía que acompañan al flujo de combustión. Esto se expresa mediante la aplicación del primer principio de la termodinámica para sistemas abiertos, adiabáticos y no estacionarios, sobre cada una de las zonas:

$$\frac{dU_{sq}}{dt} = \dot{W}_{sq} - \dot{m}_{sq \rightarrow q} \cdot h_{sq} \quad (3.7)$$

$$\frac{dU_q}{dt} = \dot{W}_q + \dot{m}_{sq \rightarrow q} \cdot h_{sq} \quad (3.8)$$

Siendo  $U$  la energía interna total de la zona,  $\dot{W}$  la potencia mecánica desarrollada sobre la zona y  $h_{sq}$  la entalpía específica de la zona fresca.

A través de las ecuaciones de conservación de la masa en cada una de las zonas, se muestra la transferencia de masa de la zona fresca a la zona quemada:

$$\dot{m}_{sq} = -\dot{m}_{sq \rightarrow q} \quad (3.9)$$

$$\dot{m}_q = \dot{m}_{sq \rightarrow q} \quad (3.10)$$

Como ecuación térmica de estado se utiliza la ecuación de los gases ideales para cada una de las zonas:

$$p \cdot \dot{V}_{sq} = m_{sq} \cdot R_{sq} \cdot T_{sq} \quad (3.11)$$

$$p \cdot \dot{V}_q = m_q \cdot R_q \cdot T_q \quad (3.12)$$

Por su parte, el volumen de la cámara de combustión en cualquier momento equivale a la suma de los volúmenes de ambas zonas:

$$V = V_{sq} + V_q \quad (3.13)$$

Presentes en las ecuaciones (3.7) y (3.8), la energía interna, la entalpía específica y la potencia mecánica de cada zona, pueden expresarse en función de la temperatura, el volumen, la composición química y la presión, que se considera la misma en ambas zonas. A su vez, la composición química de la zona fresca puede considerarse constante y conocida, mientras que la composición de la zona quemada se puede obtener mediante equilibrio químico a partir de la presión y temperatura de esta zona, y de la composición de la mezcla fresca. Finalmente, la posición del frente de llama puede deducirse a partir del volumen de los quemados.

Por lo tanto, el modelo está representado por un sistema de 7 ecuaciones, de (3.7) a (3.13), y 8 incógnitas:  $T_{sq}, T_q, V_{sq}, V_q, m_{sq}, m_q, \dot{m}_{sq \rightarrow q}, p$ .

Dado que en el modelo de diagnóstico es conocida la evolución temporal de la presión dentro de la cámara de combustión, el sistema tiene el mismo número de ecuaciones que de incógnitas, siendo así resoluble.

La velocidad de combustión se obtiene a partir del flujo de combustión mediante la siguiente expresión:

$$c_c = \frac{\dot{m}_{sq \rightarrow q}}{\rho_{sq} \cdot A_f} = \frac{\dot{m}_{sq \rightarrow q}}{\frac{p}{R_{sq} \cdot T_{sq}} \cdot A_f} \quad (3.14)$$

Donde  $c_c$  es la velocidad de combustión laminar (obtenida mediante el registro de la presión),  $\rho_{sq}$  es la densidad de la mezcla fresca y  $A_f$  es el área del frente de llama.

### 3.3.1.3. Resultados

Con el modelo de diagnóstico de 2 zonas utilizado, y para cada instante de tiempo en el que se ha registrado la presión en la cámara, es posible obtener, entre otras variables: la temperatura de la mezcla fresca, el radio del frente de llama, la ya citada velocidad de combustión y la fracción de masa quemada (FMQ). Esta última se define como el cociente entre la masa quemada en cada instante y la masa total.

Mediante el volumen de la zona quemada, y con la hipótesis de frente de llama esférico, se puede obtener el radio de dicha esfera, así como la posición del frente de llama. La evolución temporal del frente de llama, representa la velocidad de propagación del mismo, y su superficie permite calcular, finalmente, la velocidad de combustión laminar.

De los diferentes parámetros del proceso de combustión obtenidos mediante el modelo de diagnóstico, se han representado, en el apartado de resultados, las curvas presión ( $p$ ) – tiempo ( $t$ ) y las curvas velocidad de combustión laminar ( $c_c$ ) – temperatura de la mezcla fresca ( $T_{sq}$ ). Es necesario destacar que, para un par de experimentos con dosados bajos ( $Fr=0,5$ ), se producía un pequeño salto en la curva velocidad-temperatura. Dicho salto no se corresponde con la realidad durante la combustión. Es debido a que, por la gran cantidad de datos registrados, los incrementos de presión frente al tiempo son tan pequeños que, al hacer el redondeo, la derivada  $dp/dt$  puede cambiar de signo, ocasionando así saltos bruscos en otros parámetros derivados de la misma, como es el caso de la velocidad de combustión. Por este motivo, las gráficas que experimentaban este efecto han sido alisadas.

A sí mismo, se han obtenido los valores de los coeficientes de la ecuación de Metghalchi y Keck, indicada anteriormente en la ecuación 2.4, y que se vuelve a recordar a continuación.

$$c_c = c_{c,0} \cdot \left( \frac{T_{sq}}{T_{sq,0}} \right)^\alpha \cdot \left( \frac{p}{p_0} \right)^\beta$$

Para ello, se ajustan los datos de la velocidad de combustión laminar ( $c_c$ ) obtenidos experimentalmente a esta ecuación. Conocer los coeficientes de temperatura ( $\alpha$ ), de presión ( $\beta$ ) y la velocidad de combustión laminar en las condiciones de referencia ( $c_{c,0}$ ), para las diferentes composiciones y dosados de las mezclas, permite obtener ecuaciones de correlación para determinar éstos parámetros. Esto puede resultar de gran utilidad, ya que conocidas la composición de la mezcla y el dosado, para las condiciones de referencia de presión y temperatura, es posible predecir el valor de la velocidad de combustión laminar.

### 3.3.2. Procesado de Imágenes

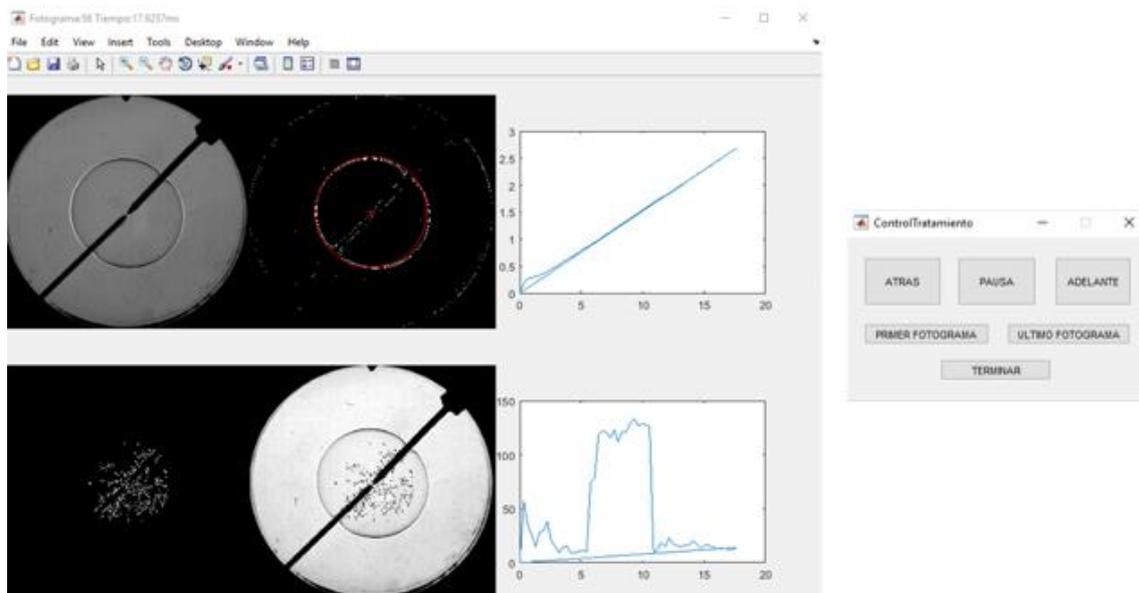
Como ya se ha comentado, y según se muestra en la *Fig 3.16*, en la bomba cilíndrica se realiza la grabación de la combustión mediante la cámara de alta velocidad. A continuación, se va a explicar brevemente el proceso de tratamiento y análisis del vídeo obtenido, hasta conseguir los diferentes parámetros que caracterizan al proceso de combustión, como la evolución del radio del frente de llama, la velocidad de propagación o la tasa de stretch de dicho frente.

Una vez se tiene el vídeo de la combustión, en formato *.avi*, se introduce en un programa diseñado en Matlab por González [67], donde es leído, fotograma a fotograma, desde el inicio hasta el final de la combustión. En éste, se extrae y almacena el primer fotograma de la captura para, posteriormente, calcular el radio de la cámara de combustión y las coordenadas de su centro. A continuación, mediante un bucle de procesamiento del algoritmo RANSAC, se calculan las circunferencias que representan el frente de llama durante la combustión.

Con la ejecución ya finalizada, el programa proporciona un archivo *.txt* en el que se obtienen: el tiempo en milisegundos, el radio del frente de llama en centímetros, y la densidad celular, medida en número de células por centímetro cuadrado, para los diferentes fotogramas. Este último parámetro no ha sido tenido en cuenta en el análisis de datos del presente trabajo, debido a la inexactitud e incongruencia de los resultados arrojados por el programa.

En la *Fig 3.17* se muestra la interfaz del programa. La imagen superior hace referencia al cálculo del radio del frente de llama, mientras que la inferior representa el de células por unidad de superficie de dicho frente. También se muestra, en la parte derecha de la imagen, el panel de control del programa, con el que se puede retroceder o avanzar hacia el fotograma deseado, para poder guardar la imagen y posteriormente analizarla cualitativamente. Para el presente trabajo, se han tomado los fotogramas para radios del frente de 1, 2, 3, 4 y 5 cm. Radios inferiores y superiores están fuertemente influenciados por la chispa y las paredes de la cámara de combustión, respectivamente, por lo que no son representativos.

En el apartado de resultados, estas imágenes para diferentes radios del frente de llama se representan en forma matricial, para los diferentes dosados. De este modo se apreciará, tanto la evolución del frente de llama como las irregularidades en la superficie del mismo, con el tiempo (aumentando su radio) y con los diferentes dosados analizados.

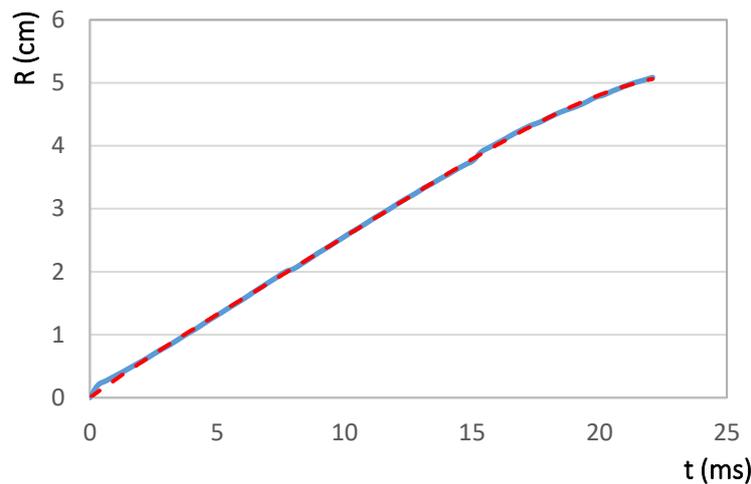


*Fig 3.17. Interfaz del programa de Matlab con el cálculo del radio del frente de llama (superior izquierda), la celularidad (inferior izquierda) y el panel de control para la ejecución del programa.*

### 3.3.2.1. Resultados del modelo de tratamiento de imágenes

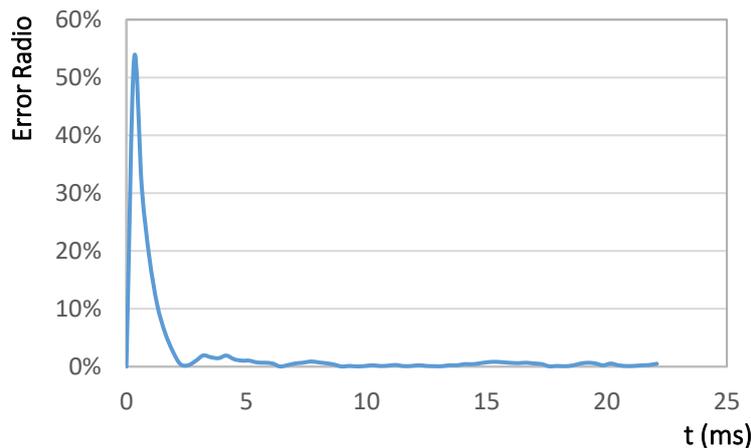
Una vez se han obtenido los datos y las imágenes de la combustión con el programa, es necesario analizarlos y graficarlos para poder obtener las conclusiones oportunas.

El radio del frente de llama proporcionado por el programa es una aproximación realizada por el algoritmo, en un intento de trazar la circunferencia que se ajusta a dicho frente. Con el fin de reducir las discontinuidades o saltos que pueda presentar la curva de la evolución temporal del radio, se ha de alisar o ajustar, como se muestra en la *Fig 3.18*.



**Fig 3.18.** Evolución del radio del frente de llama proporcionado por Matlab (azul) y su ajuste (rojo). 25%  $H_2$  - 75%  $CO$ ,  $Fr = 0.7$ ,  $p = 1$  bar,  $T = 300$  K.

En la Fig 3.19, se comprueba el error entre el radio alisado y el proporcionado por Matlab, y se observa que, a excepción de para los primeros instantes, en los que el error es importante debido a las dificultades del programa de ajustar el frente de llama a una esfera, es prácticamente coincidente para todos los experimentos. De este modo se concluye que al ajuste realizado no afecta a los resultados obtenidos.

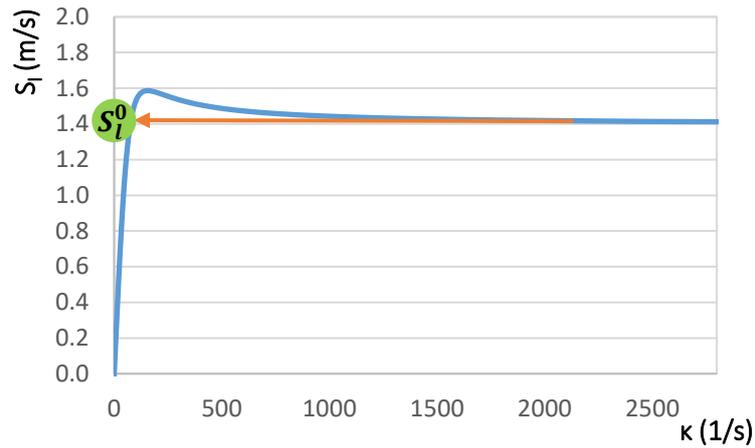


**Fig 3.19.** Error entre el radio proporcionado por Matlab y el radio ajustado, en función del tiempo. 25%  $H_2$  - 75%  $CO$ ,  $Fr = 0.7$ ,  $p = 1$  bar,  $T = 300$  K.

También es necesario calcular la velocidad de propagación ( $S_l$ ), que representa la derivada del radio del frente de llama respecto al tiempo, según se indicó en la ecuación 2.1. Dado que los intervalos de tiempo son los suficientemente pequeños, se puede calcular como el cociente de los incrementos del radio entre los del tiempo.

Con el radio y la velocidad de propagación del frente ya calculados, se obtiene la tasa de stretch ( $\kappa$ ) del mismo. Como ya se mostró en la ecuación 2.7, para una llama de propagación esférica, se puede expresar como el cociente de dos veces la velocidad de propagación entre el radio del frente de llama.

Además, representando la velocidad de propagación frente a la tasa de stretch, se aprecia un tramo en el que la primera es independiente de la segunda, que se corresponde con el tramo horizontal de la curva mostrada en la Fig 3.20. Si se prolonga dicho tramo, el punto de corte con el eje de ordenadas, representa la velocidad de propagación laminar sin stretch  $S_l^0$ .



**Fig 3.20.** Evolución de la velocidad de propagación frente a la tasa de stretch de la llama, y obtención de la velocidad de propagación sin stretch,  $S_l^0$ . 6.7%  $H_2$  - 93.3%  $CO$ ,  $Fr = 0.7$ ,  $p = 1 \text{ bar}$ ,  $T = 300 \text{ K}$ .

Una vez se conoce  $S_l^0$ , se puede obtener la velocidad de combustión laminar sin stretch  $u_l^0$ , mediante la ecuación:

$$u_l^0 = S_l^0 \cdot \frac{\rho_q}{\rho_{sq}} \quad (3.15)$$

Donde  $\rho_q$  y  $\rho_{sq}$  son la densidad de los gases quemados y de la mezcla fresca, respectivamente.

Finalmente, despejando de la ecuación 2.8, que relacionaba la velocidad de propagación con la tasa de stretch, se puede obtener la longitud de Markstein  $L_b$ , que como ya se ha comentado, es un parámetro que expresa la sensibilidad de la velocidad de propagación con la tasa de stretch.

Se ha ilustrado así, cómo, mediante el procesado de las imágenes del vídeo de la combustión, se han obtenido los diferentes parámetros que la caracterizan. En el apartado correspondiente de resultados, se representarán dichos parámetros de forma conveniente, para los diferentes dosados ensayados, de modo que se puedan extraer las conclusiones oportunas.

# 4. RESULTADOS

---



## 4.1. Introducción a los resultados

Una vez se han realizado los diferentes experimentos y se ha explicado el tratamiento de los datos obtenidos de los mismos, se va a hacer una breve introducción acerca de la estructura llevada a cabo para la representación de los resultados, para entender así con mayor claridad los diferentes aspectos analizados.

En primer lugar, se muestran los resultados de la bomba de combustión de volumen constante **esférica**. Aquí, se incluye un estudio paramétrico sobre los resultados obtenidos mediante el modelo de diagnóstico de dos zonas, de las mezclas H<sub>2</sub>-CO, en el que se estudia la influencia de la composición de la mezcla (%H<sub>2</sub> en el combustible) y del dosado, tanto en la *presión* ( $p-t$ ) como en la *velocidad de combustión* ( $Cc-Tsq$ ). Además, se obtienen las correlaciones en función de la temperatura y la presión, como las de la ecuación de Metghalchi y Keck [23]. Para finalizar, los resultados extraídos de la bomba esférica se comparan con los obtenidos por diferentes autores de la bibliografía, pudiendo así confirmar la validez de los mismos.

En un segundo apartado se realiza el estudio paramétrico, también variando la composición y el dosado de la mezcla, en este caso para la bomba de combustión **cilíndrica**. Dado que en esta bomba se puede visualizar el proceso de combustión se incluyen, además de los resultados de la *presión* ( $p-t$ ) y la *velocidad de combustión* ( $Cc-Tsq$ ), obtenidos mediante el modelo de diagnóstico de dos zonas, el resto de parámetros que caracterizan el proceso, obtenidos mediante el análisis de las imágenes. Éstos incluyen: la *morfología de la llama*, en forma de matriz composición de la mezcla - radio del frente y dosado - radio del frente de las imágenes Schlieren; la evolución del *radio del frente de llama*, mediante las gráficas del radio del frente - tiempo ( $R-t$ ); la *velocidad de propagación* de dicho frente de llama, mediante la representación de la velocidad de propagación respecto al radio del frente ( $S_f-R$ ) y respecto a la tasa de stretch ( $S_f-K$ ); y, por último, la *velocidad de propagación laminar* ( $S_f^0 - \%H_2$ ,  $S_f^0 - Fr$ ) y la *velocidad de combustión laminar* ( $u_f^0 - \%H_2$ ,  $u_f^0 - Fr$ ).

Finalmente, se hace una **comparación** de los resultados obtenidos entre la bomba esférica y la cilíndrica, con lo que se persigue mostrar la influencia de la deformación del frente de llama, supuesto inicialmente esférico, que se produce en la bomba cilíndrica. Aquí, nuevamente, se analizan los resultados para diferentes composiciones y dosados de la mezcla. Se representarán, para ambas bombas, la evolución de las *presiones* respecto al tiempo ( $p-t$ ) y las *velocidades de combustión laminar*, la obtenida mediante el modelo de diagnóstico de dos zonas en la bomba esférica ( $Cc$ ) y mediante el análisis de las imágenes en la bomba cilíndrica ( $u_f^0$ ). Por último, los resultados de ambas bombas de combustión se comparan y validan con la bibliografía.

Para concluir la presente introducción a los resultados, se vuelven a recordar las condiciones bajo las que han sido realizados todos los experimentos, así como las diferentes composiciones de las mezclas y dosados que se han sido analizadas.

- Composición mezcla:    **0% H<sub>2</sub> - 100% CO**  
                                  **6.7% H<sub>2</sub> - 93.3% CO**  
                                  **25% H<sub>2</sub> - 75% CO**  
                                  **50% H<sub>2</sub> - 50% CO**  
                                  **80% H<sub>2</sub> - 20% CO**  
                                  **100% H<sub>2</sub> - 0% CO**
- Dosado relativo:        **Fr = 0.5 – 1**
- Presión inicial:         **Pi = 1 bar**
- Temperatura inicial:   **Ti = 300 K**

## 4.2. Bomba Esférica

Debido a la geometría de la cámara de combustión de la bomba esférica, no se produce la deformación del frente de llama, también esférico, de modo que el desarrollo de la combustión en la misma se puede aproximar al teórico, dictado por el modelo de diagnóstico de dos zonas. Es por este motivo, que los resultados obtenidos en esta bomba se tomarán como referencia.

### 4.2.1. Estudio Paramétrico: Resultados del modelo de diagnóstico de dos zonas

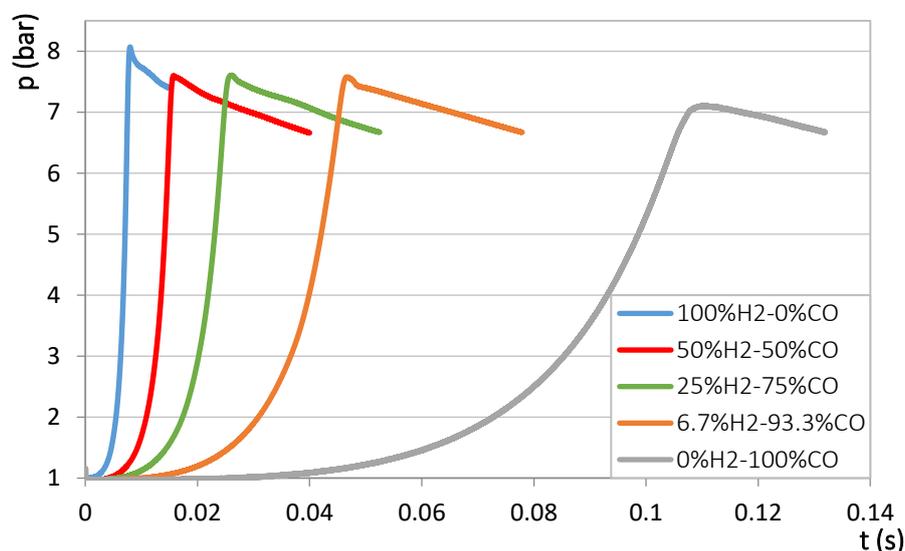
Como ya se ha mencionado, se va a realizar un estudio paramétrico, es decir, se varía un parámetro mientras se mantienen fijos el resto. De esta forma se puede comprobar la influencia que tiene el parámetro variable sobre el proceso de combustión, que en este caso son la composición de la mezcla y el dosado relativo de la misma. En primer lugar, se ha variado la composición de la mezcla combustible (0, 6.7, 25, 50, 100% H<sub>2</sub>), manteniendo constantes el resto de variables, como son la presión (1 bar), la temperatura (300 K) y el dosado relativo (estequiométrico). Posteriormente, se ha variado el dosado relativo de la mezcla (0.5-1), manteniendo constantes la composición (realizando el mismo proceso para las de 6.7, 25 y 50% H<sub>2</sub>), la presión y la temperatura.

#### 4.2.1.1. Influencia de la composición de la mezcla

Como se comentó en la revisión del estado del arte, uno de los principales retos a superar para el desarrollo del gas de síntesis como un combustible alternativo, es la gran influencia de la composición del mismo en la velocidad de combustión laminar. Es por ello necesario conocer el comportamiento del combustible para diferentes composiciones.

##### 4.2.1.1.1. Presión

En la Fig 4.1 se observa la evolución de la presión con el tiempo para diferentes composiciones de la mezcla combustible, todas ellas para el dosado estequiométrico, a 1 bar y 300 K.



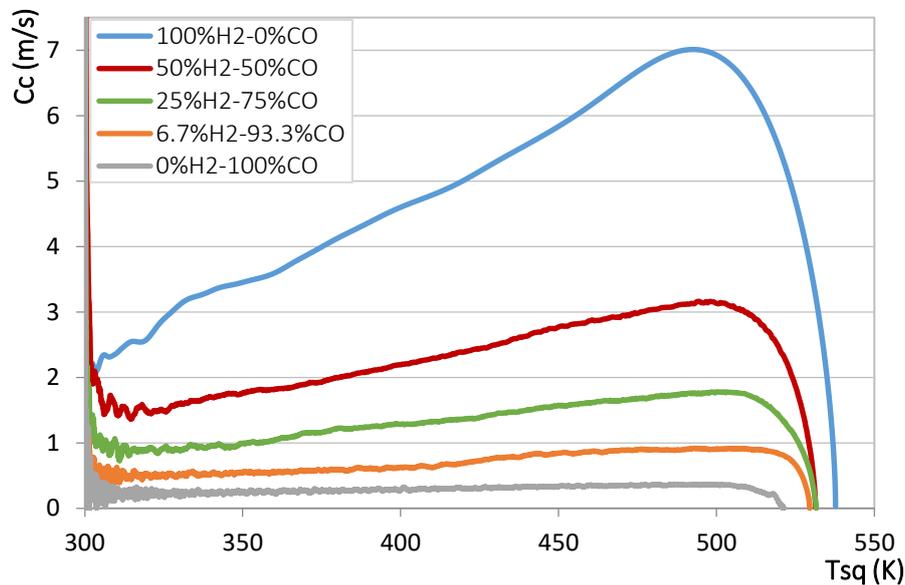
**Fig 4.1.** Influencia de la composición de la mezcla en la evolución de la presión frente al tiempo, en la bomba esférica. %H<sub>2</sub> = 0, 6.7, 25, 50 y 100%, Fr = 1, p = 1 bar, T = 300 K.

De esta gráfica se puede extraer que, a medida que aumenta el contenido en hidrógeno de la mezcla, se alcanzan valores de presión más altos. Esta tendencia se aprecia claramente al comparar las curvas de 0 y 100% de H<sub>2</sub>, ya que en las mezclas con proporciones bajas y medias (6.7, 25 y 50% H<sub>2</sub>) los picos de presión se mantienen prácticamente constantes.

A su vez, al aumentar el contenido de hidrógeno en la mezcla se producen combustiones más rápidas, ya que los picos de presión se alcanzan en tiempos menores. Es interesante comparar las curvas de 0 y 6.7% de hidrógeno, comprobando que el pico de presión para el caso del 6.7% H<sub>2</sub> se produce en menos de la mitad del tiempo que para el caso de monóxido de carbono puro. Esto refleja la gran influencia que tiene el contenido de hidrógeno de la mezcla en la velocidad de la combustión.

#### 4.2.1.1.2. Velocidad de combustión

En la Fig 4.2 se representan las curvas de velocidad de combustión laminar frente a la temperatura de la mezcla fresca, obtenidas después de pasar el modelo de diagnóstico de dos zonas a las curvas de presión mostradas anteriormente. En esta figura se observa como el incremento en el contenido en hidrógeno de la mezcla hace que la velocidad de combustión laminar aumente de forma significativa. Además, observando el eje de abscisas, se puede afirmar que la temperatura de los inquemados también aumenta con el contenido en hidrógeno de la mezcla.



**Fig 4.2.** Influencia de la composición de la mezcla en la velocidad de combustión laminar frente a la temperatura de la mezcla fresca, en la bomba esférica. %H<sub>2</sub> = 0, 6.7, 25, 50 y 100%, Fr = 1, p = 1 bar, T = 300 K.

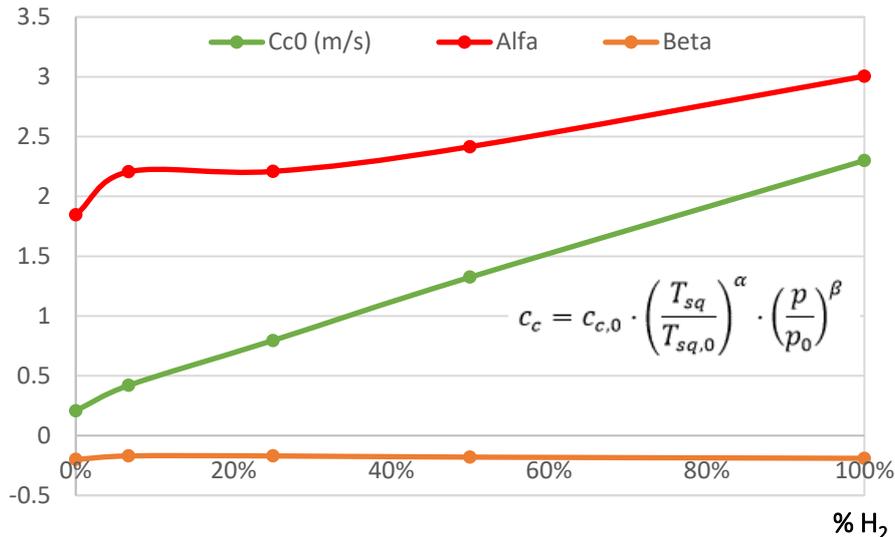
A modo de síntesis y para concluir con este apartado, se puede afirmar que tras los experimentos realizados en la bomba esférica, con mezclas H<sub>2</sub>-CO, tanto los valores máximos de la presión como la velocidad de combustión laminar se ven incrementados con el contenido en hidrógeno de la mezcla combustible.

Se confirma de este modo el efecto potenciador de la combustión que tiene el hidrógeno, como han informado los diferentes autores consultados en la bibliografía.

A continuación se incluyen en la Tabla 4.1 y en la Fig 4.3, para las diferentes composiciones de mezcla, los valores de las correlaciones obtenidas, ajustando los datos experimentales de la velocidad de combustión a la ecuación dada por Metghalchi y Keck.

|                 | 0% H <sub>2</sub> | 6.7% H <sub>2</sub> | 25% H <sub>2</sub> | 50% H <sub>2</sub> | 100% H <sub>2</sub> |
|-----------------|-------------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| $C_{c,0}$ (m/s) | 0.208             | 0.419               | 0.795              | 1.325              | 2.300               |
| $\alpha$        | 1.846             | 2.206               | 2.209              | 2.416              | 3.005               |
| $\beta$         | -0.20             | -0.17               | -0.17              | -0.18              | -0.19               |

**Tabla 4.1.** Correlaciones para los coeficientes de velocidad ( $C_{c,0}$ ), temperatura ( $\alpha$ ) y presión ( $\beta$ ), en función de la composición de la mezcla. %H<sub>2</sub> = 0, 6.7, 25, 50 y 100%,  $Fr = 1$ ,  $p = 1$  bar,  $T = 300$  K.



**Fig 4.3.** Evolución de los coeficientes de velocidad ( $C_{c,0}$ ), temperatura ( $\alpha$ ) y presión ( $\beta$ ) en función de la composición de la mezcla. %H<sub>2</sub> = 0, 6.7, 25, 50 y 100%,  $Fr = 1$ ,  $p = 1$  bar,  $T = 300$  K.

A la vista de los resultados se obtienen varias conclusiones. En primer lugar, que el coeficiente de presión ( $\beta$ ) tiene valor negativo, permaneciendo muy constante con la variación de la composición de la mezcla, con un valor medio de -0.18. En cuanto al valor del coeficiente de temperatura ( $\alpha$ ) se muestra una clara tendencia ascendente con el porcentaje de hidrógeno en la mezcla, siendo su valor mínimo para el caso de CO puro (1.846) y su valor máximo para el caso de H<sub>2</sub> puro (3.005). El valor de la velocidad de combustión en las condiciones de referencia ( $C_{c,0}$ ) experimenta esta misma tendencia, positiva con el incremento de hidrógeno en la mezcla, teniendo su mínimo para el CO puro (0.208) y su máximo para H<sub>2</sub> puro (2.300).

Ajustando las gráficas de los diferentes coeficientes, se pueden obtener ecuaciones predictivas para cada uno de ellos, de modo que, conociendo el valor del contenido de hidrógeno en la mezcla, para el dosado estequiométrico y a las condiciones de presión y temperatura de referencia de 1 bar y 300 K, se puedan calcular cada uno de ellos. Estas ecuaciones se muestran a continuación:

$$C_{c,0} = 2.063 \cdot \frac{\% H_2}{100} + 0.260$$

$$\alpha = 1.018 \cdot \frac{\% H_2}{100} + 1.966$$

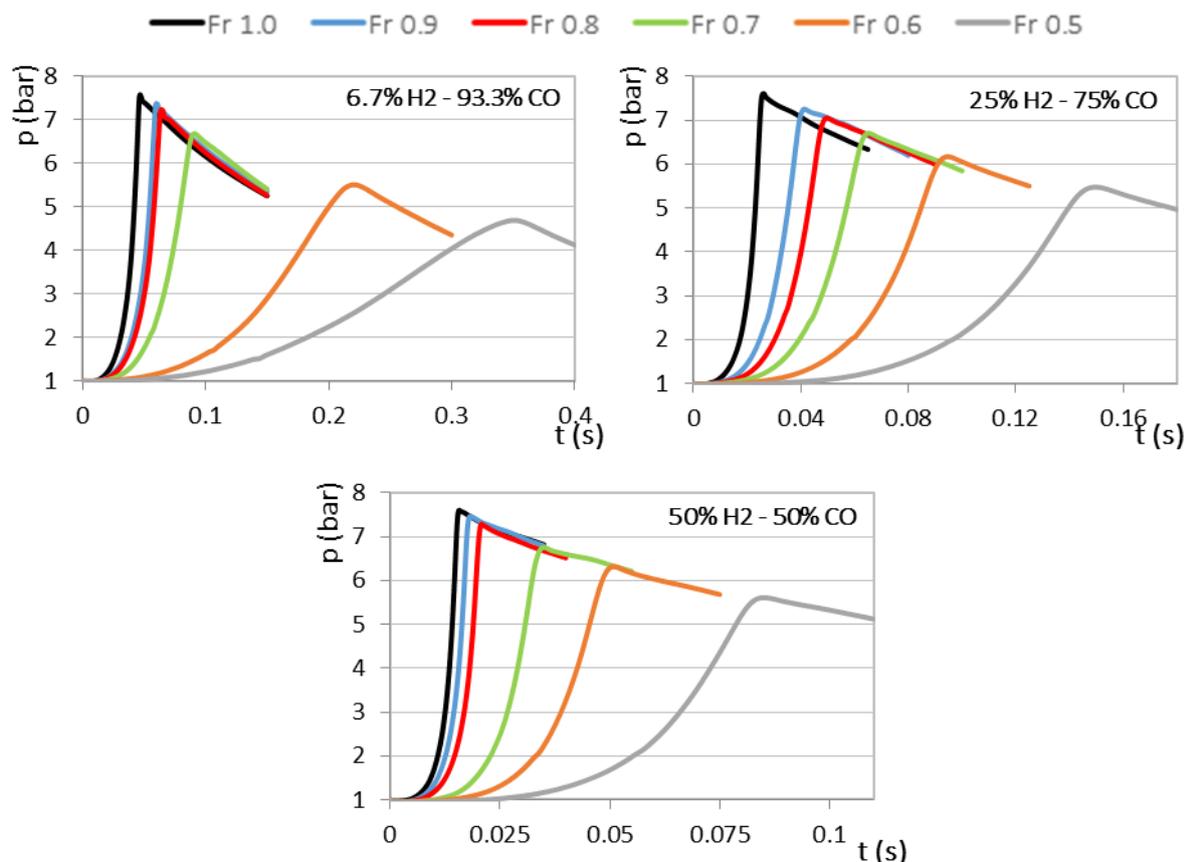
$$\beta \approx cte = -0.180$$

#### 4.2.1.2. Influencia del Dosado

Conocer la influencia del dosado de operación en los parámetros característicos de la combustión es necesario para poder determinar las condiciones óptimas de funcionamiento del motor y, además, alcanzar una solución de compromiso entre un dosado bajo, que permita un ahorro de combustible, y la consecución de una buena combustión.

##### 4.2.1.2.1. Presión

En la siguiente figura, se muestra la evolución de la presión respecto al tiempo para tres mezclas combustibles, con porcentajes de hidrógeno del 6.7, 25 y 50%, en cada una de las cuales se ha variado el dosado relativo de 0.5 a 1, y se han mantenido constantes la presión y la temperatura en 1 bar y 300 K, respectivamente.



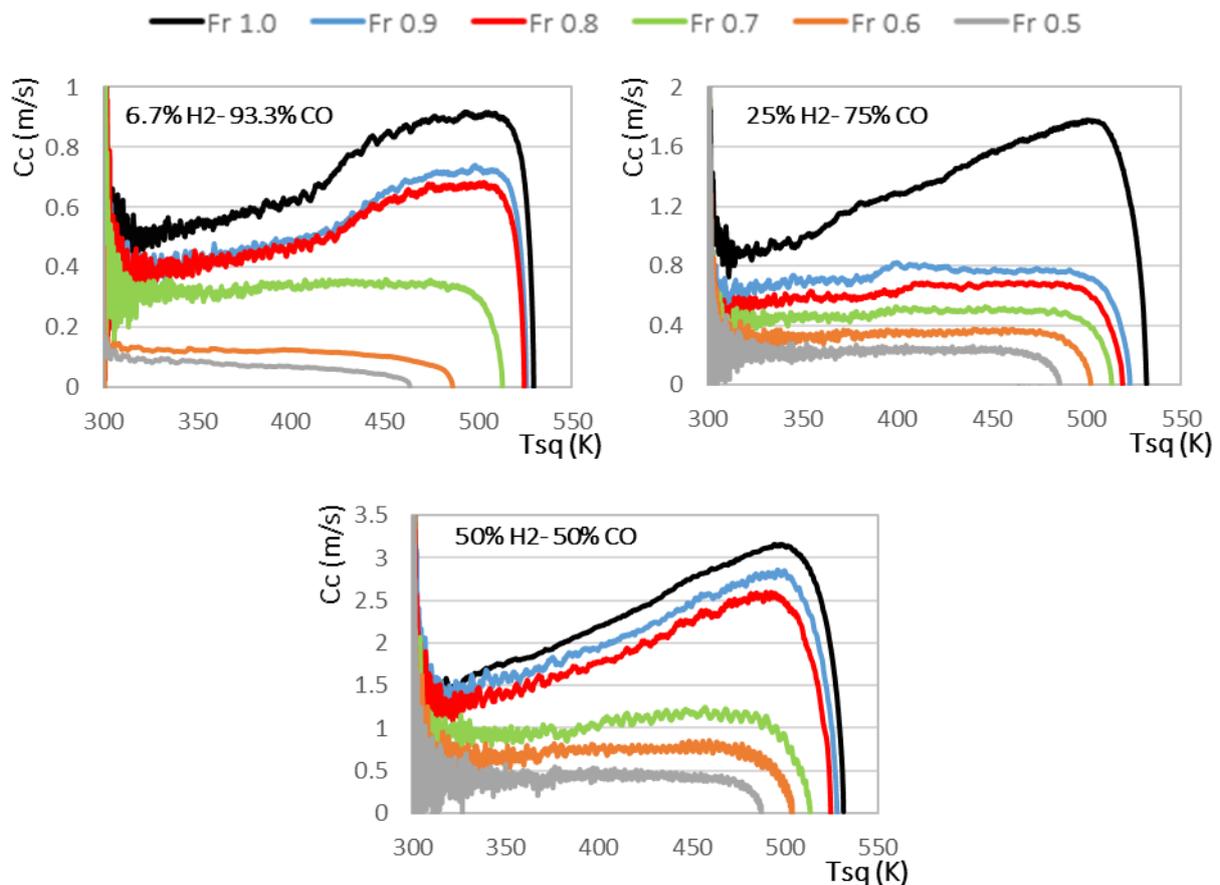
**Fig 4.4.** Influencia del dosado en la evolución de la presión frente al tiempo, en la bomba esférica. 6.7%  $H_2$  - 93.3%  $CO$ , 25%  $H_2$  - 75%  $CO$ , 50%  $H_2$  - 50%  $CO$ ,  $Fr = 0.5 - 1$ ,  $p = 1$  bar,  $T = 300$  K.

A la vista de los resultados, se puede afirmar que, para una mezcla dada, a medida que aumenta el dosado se alcanzan valores de presión más elevados, y además lo hacen en menos tiempo, indicativo de una combustión más rápida, como era de esperar.

Además, como ya se observó en la Fig 4.1, para las mezclas con contenidos del 6.7, 25 y 50% de hidrógeno, los picos de presión para cada uno de los dosados se mantienen bastante constantes, siendo ligeramente superiores para el caso de las mezclas más ricas en  $H_2$ . Destacan los picos de presión de la mezcla de 6.7%  $H_2$ , para dosados de 0.5 y 0.6, por ser considerablemente inferiores a los de sus homólogos más ricos en hidrógeno. Ello es debido a que la mezcla es demasiado pobre, tanto en dosado como en contenido de  $H_2$  se refiere.

#### 4.2.1.2.2. Velocidad de combustión

La velocidad de combustión laminar frente a la temperatura de la mezcla fresca, para las tres mezclas y variando los dosados, se muestra en la Fig 4.5.



**Fig 4.5.** Influencia del dosado en la evolución de la velocidad de combustión laminar frente a la temperatura de la mezcla fresca, en la bomba esférica. 6.7% H<sub>2</sub> - 93.3% CO, 25% H<sub>2</sub> - 75% CO, 50% H<sub>2</sub> - 50% CO,  $Fr = 0.5 - 1$ ,  $p = 1$  bar,  $T = 300$  K.

Se puede apreciar, para las tres mezclas combustibles, que a medida que aumenta el dosado también lo hace la velocidad de combustión laminar, alcanzando su máximo para el estequiométrico de las mismas.

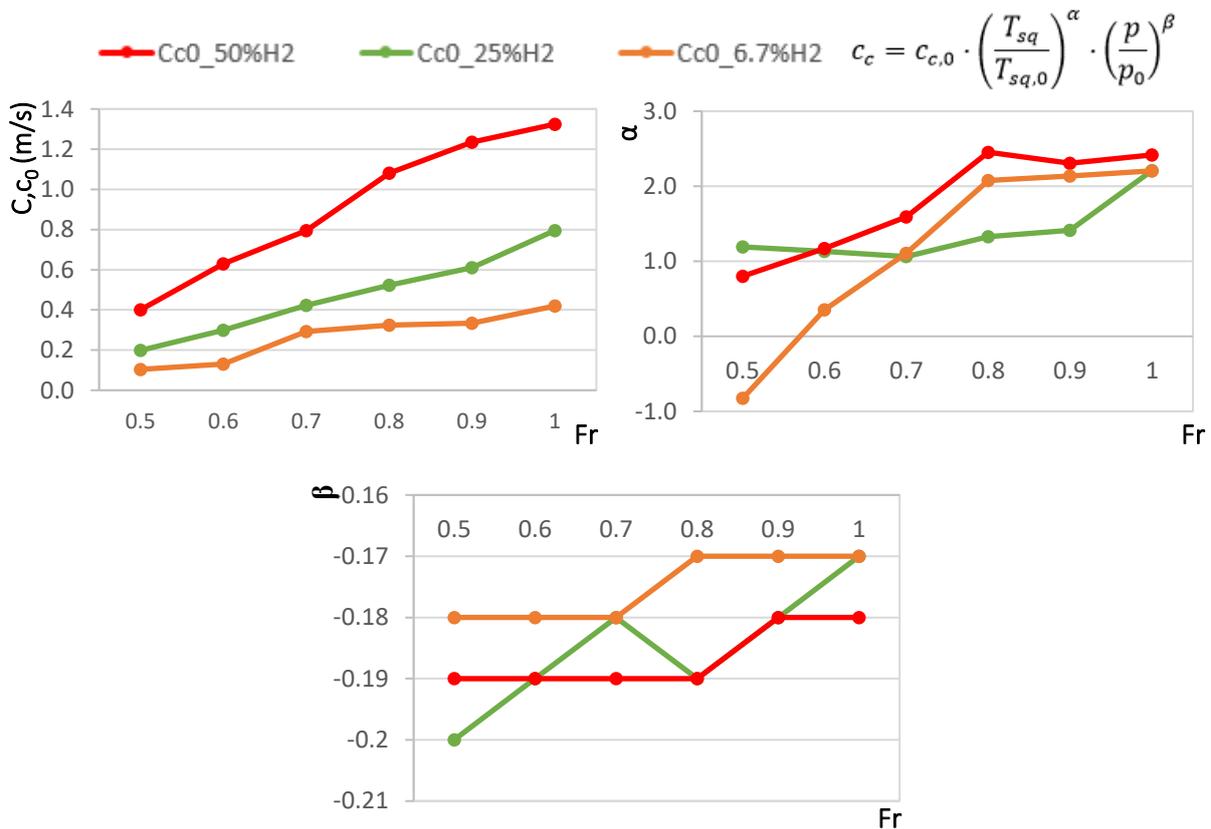
También se puede deducir que, para los dosados más bajos, la velocidad de combustión se mantiene prácticamente constante con la temperatura de los inquemados, como muestran las curvas prácticamente horizontales. A medida que aumenta el dosado, la pendiente de las mismas (relación entre  $C_c$  y  $T_{sq}$ ) se hace más pronunciada. Por su parte, la mezcla de 6.7% de hidrógeno con dosado de 0.5, presenta una evolución decreciente de la velocidad de combustión laminar a medida que aumenta la temperatura de los inquemados, como muestra la curva de pendiente descendente que la representa. Este efecto es indicativo de una combustión muy lenta e inestable.

Finalmente, y combinando la información extraída acerca la influencia de la composición y el dosado de la mezcla sobre la velocidad de combustión laminar, se puede concluir que el efecto de enriquecer la mezcla con dosados más altos tiene efectos similares a aumentar el contenido de hidrógeno en el gas de síntesis.

Una vez más, y con el objetivo de predecir el valor de los coeficientes de la ecuación de Metghalchi y Keck, se van a representar en la *Tabla 4.2* y en la *Fig 4.6*, para las mezclas de 6.7, 25 y 50% de H<sub>2</sub>, las correlaciones para los diferentes dosados analizados.

| Mezcla              | Fr              | 0.5    | 0.6   | 0.7   | 0.8   | 0.9   | 1     |
|---------------------|-----------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 6.7% H <sub>2</sub> | $C_{c,0}$ (m/s) | 0.104  | 0.131 | 0.293 | 0.324 | 0.334 | 0.419 |
|                     | $\alpha$        | -0.827 | 0.352 | 1.106 | 2.075 | 2.135 | 2.206 |
|                     | $\beta$         | -0.18  | -0.18 | -0.18 | -0.17 | -0.17 | -0.17 |
| 25% H <sub>2</sub>  | $C_{c,0}$ (m/s) | 0.199  | 0.299 | 0.422 | 0.522 | 0.611 | 0.795 |
|                     | $\alpha$        | 1.194  | 1.133 | 1.062 | 1.327 | 1.415 | 2.209 |
|                     | $\beta$         | -0.2   | -0.19 | -0.18 | -0.19 | -0.18 | -0.17 |
| 50% H <sub>2</sub>  | $C_{c,0}$ (m/s) | 0.401  | 0.630 | 0.795 | 1.082 | 1.235 | 1.325 |
|                     | $\alpha$        | 0.801  | 1.172 | 1.592 | 2.453 | 2.309 | 2.416 |
|                     | $\beta$         | -0.19  | -0.19 | -0.19 | -0.19 | -0.18 | -0.18 |

**Tabla 4.2.** Correlaciones para los coeficientes de velocidad ( $C_{c,0}$ ), temperatura ( $\alpha$ ) y presión ( $\beta$ ), en función del dosado. 6.7% H<sub>2</sub> - 93.3% CO, 25% H<sub>2</sub> - 75% CO, 50% H<sub>2</sub> - 50% CO,  $Fr = 0.5-1$ ,  $p = 1$  bar,  $T = 300$  K.



**Fig 4.6.** Evolución de los coeficientes de velocidad ( $C_{c,0}$ ), temperatura ( $\alpha$ ) y presión ( $\beta$ ), en función del dosado. 6.7% H<sub>2</sub> - 93.3% CO, 25% H<sub>2</sub> - 75% CO, 50% H<sub>2</sub> - 50% CO,  $Fr = 0.5-1$ ,  $p = 1$  bar,  $T = 300$  K.

De los resultados se puede extraer que, el coeficiente de presión ( $\beta$ ) tiene un valor negativo y aproximadamente constante con la variación del dosado, para cada una de las mezclas, con un valor medio de -0.185. En cuanto al valor del coeficiente de temperatura ( $\alpha$ ), experimenta una tendencia general de aumento al incrementarse el dosado, siendo su valor mínimo para los dosados de 0.5, y el máximo para los estequiométricos, en todas las mezclas. Destaca el coeficiente de temperatura de la mezcla con 6.7% de  $H_2$ , por ser el que más aumenta con el dosado. Además, para esta misma mezcla, se tiene un valor negativo para el dosado más pobre. Ello es debido a que, como se puede apreciar en la Fig 4.5, la curva  $Cc-Tsq$  es descendente, motivo de la inestabilidad de la llama de esa mezcla, pobre tanto en contenido de hidrógeno como de dosado, como ya se comentó en su momento. La velocidad de combustión en las condiciones de referencia ( $C, c_0$ ), por su parte, es la que experimenta el aumento con el dosado más claro de todos los coeficientes mostrados. Además, a medida que aumenta el contenido en hidrógeno de la mezcla, el valor de  $C, c_0$  también se ve incrementado, y con éste la velocidad de combustión laminar, como ya se había afirmado.

Al igual que se hizo anteriormente, ajustando las gráficas de los diferentes coeficientes, se pueden obtener ecuaciones predictivas para cada uno de ellos, de modo que, conociendo el valor del dosado de la mezcla, para las condiciones de presión y temperatura de referencia de 1 bar y 300 K, se puedan calcular cada uno de ellos. En la Tabla 4.3 se reúnen las ecuaciones de correlación de los diferentes coeficientes obtenidos.

|                | 6.7% $H_2$               | 25% $H_2$                | 50% $H_2$                |
|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| $C, c_0$ (m/s) | $0.192 \cdot Fr + 0.239$ | $0.115 \cdot Fr + 0.073$ | $0.063 \cdot Fr + 0.046$ |
| $\alpha$       | $0.353 \cdot Fr + 0.556$ | $0.177 \cdot Fr + 0.771$ | $0.614 \cdot Fr - 0.974$ |
| $\beta$        | $\approx -0.175$         | $\approx -0.185$         | $\approx -0.185$         |

**Tabla 4.3.** Ecuaciones de correlación para los coeficientes de velocidad ( $C, c_0$ ), temperatura ( $\alpha$ ) y presión ( $\beta$ ), en función del dosado. 6.7%  $H_2$  - 93.3%  $CO$ , 25%  $H_2$  - 75%  $CO$ , 50%  $H_2$  - 50%  $CO$ ,  $Fr = 0.5-1$ ,  $p = 1$  bar,  $T = 300$  K.

A su vez, realizando el ajuste global de las curvas de la Fig 4.6, se consigue obtener una estimación para cada uno de los coeficientes en función, únicamente, del dosado, sin tener en cuenta la composición de la mezcla.

En la Tabla 4.4 se incluyen los resultados obtenidos, y a continuación de ésta, las ecuaciones predictivas de cada uno de los coeficientes.

| $Fr$           | 0.5    | 0.6    | 0.7    | 0.8    | 0.9    | 1      |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $C, c_0$ (m/s) | 0.243  | 0.366  | 0.489  | 0.613  | 0.736  | 0.860  |
| $\alpha$       | 0.499  | 0.880  | 1.261  | 1.642  | 2.023  | 2.404  |
| $\beta$        | -0.190 | -0.187 | -0.184 | -0.181 | -0.177 | -0.174 |

**Tabla 4.4.** Correlaciones para los coeficientes de velocidad ( $C, c_0$ ), temperatura ( $\alpha$ ) y presión ( $\beta$ ), en función del dosado.  $Fr = 0.5-1$ ,  $p = 1$  bar,  $T = 300$  K.

$$C_{c0} = C_{c0,1} + C_{c0,2} \cdot (Fr - 1) = 0.860 + 1.234 \cdot (Fr - 1)$$

$$\alpha = A_{\alpha} + B_{\alpha} \cdot (Fr - 1) = 2.404 + 3.810 \cdot (Fr - 1)$$

$$\beta = A_{\beta} + B_{\beta} \cdot (Fr - 1) = -0.174 + 0.032 \cdot (Fr - 1)$$

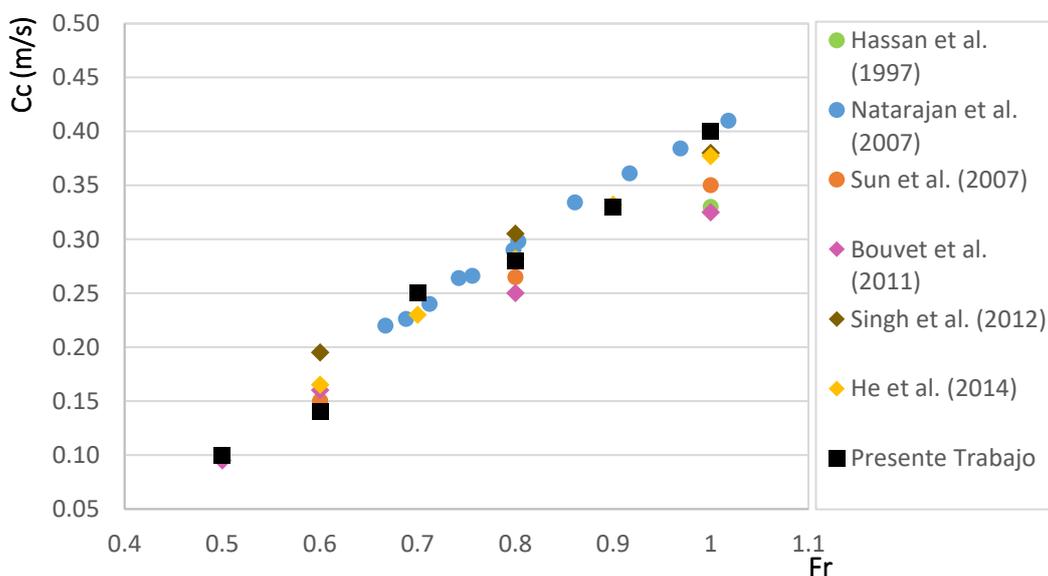
Obtener el valor aproximado de estos coeficientes, así como sus ecuaciones de correlación en función de la composición de la mezcla y del dosado, es muy útil para predecir la velocidad de combustión u otros parámetros relacionados. Siempre teniendo en cuenta, que están obtenidos para el gas de síntesis con estas composiciones, en las condiciones de presión y temperatura de referencia de 1 bar y 300 K, respectivamente.

#### 4.2.2. Comparación y validación con la bibliografía

Una vez se han obtenido los resultados de la experimentación en la bomba esférica, es necesario compararlos con los obtenidos por otros autores de la bibliografía. De esta forma se consigue comprobar la coherencia de los resultados del presente trabajo y dar validez a los mismos.

En las figuras mostradas a continuación, se representan los resultados de la evolución de la velocidad de combustión laminar frente al dosado, para las diferentes composiciones de mezcla analizadas, de diferentes autores de la bibliografía y del presente trabajo.

Como ya se ha comentado con anterioridad, el valor de la velocidad de combustión laminar (aquí indicado) resulta de la intersección de la curva de la velocidad de combustión con el eje de ordenadas (curvas Cc-Tsq). Dicho de otro modo, la velocidad de combustión laminar aquí indicada es la de las condiciones de referencia, a 1 bar y 300 K.



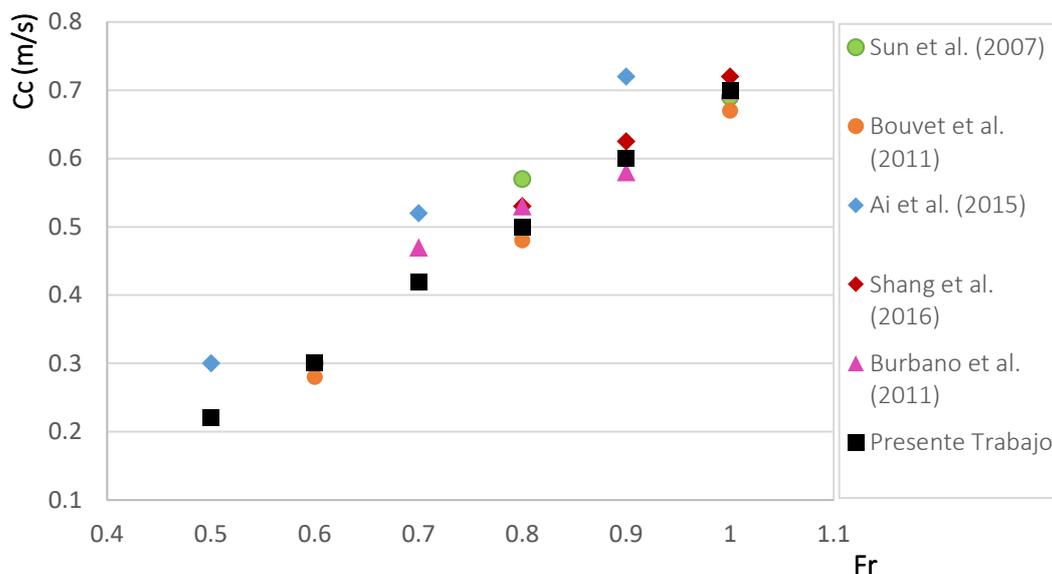
**Fig 4.7.** Comparación con los datos de la bibliografía de la velocidad de combustión laminar frente al dosado.  $6.7\%H_2 - 93.3\%CO$ ,  $Fr = 0.5-1$ ,  $p = 1$  bar,  $T = 300$  K.

En la Fig 4.7 se muestra la comparación con diferentes autores de la velocidad de combustión laminar frente al dosado, para la mezcla de  $6.7\% H_2 - 93.3\% CO$ . Es necesario mencionar que los datos de los autores están obtenidos para la mezcla de  $5\% H_2 - 95\% CO$ , pero la pequeña diferencia de composiciones no afecta a los resultados. Para sus respectivos estudios, Hassan et al. [69], Sun et al. [56], Bouvet et al. [53] y Singh et al. [59] utilizaron una bomba de combustión cilíndrica; por su parte, Natarajan et al. [60] emplearon un mechero Bunsen; mientras, He et al.

[70] se ayudaron de un quemador de flujo. Para más información, se recomienda consultar las respectivas referencias.

Como se puede observar, los datos de las velocidades de combustión laminar obtenidos en el presente trabajo, son muy similares y siguen la misma tendencia que los de los diferentes autores, indicando así que la metodología experimental desarrollada es correcta, y dando por ello validez a los resultados obtenidos.

La comparación para la mezcla de 25% H<sub>2</sub> – 75% CO, se muestra en la Fig 4.8. En cuanto a la instalación experimental, Sun et al. [56] y Bouvet et al. [53] utilizaron una bomba cilíndrica; Ai et al. [71] necesitaron de una bomba cilíndrica de doble cámara, ya que es la que soporta las presiones más elevadas, que también fueron objeto de su estudio; por su parte, Burbano et al. [62] y Shang et al. [72] emplearon para realizar la combustión un mechero Bunsen.

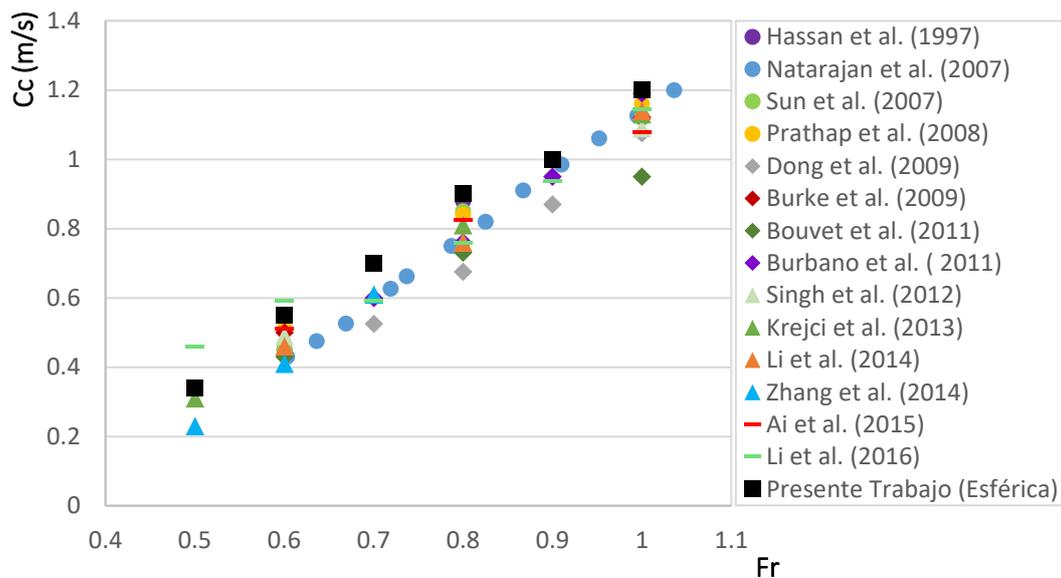


**Fig 4.8.** Comparación con los datos de la bibliografía de la velocidad de combustión laminar frente al dosado. 25% $H_2$  – 75% $CO$ ,  $Fr = 0.5-1$ ,  $p = 1$  bar,  $T = 300$  K.

A la vista de los resultados, que van en la misma línea que los obtenidos por los autores, se puede concluir que las combustiones realizadas para esta mezcla han sido correctas y, por lo tanto, dichos resultados se pueden dar como válidos.

Para mezclas de composición 50% H<sub>2</sub> – 50% CO, existe una gran base de datos sobre la velocidad de combustión laminar en condiciones atmosféricas, como se muestra en la Fig 4.9.

En cuanto a las instalaciones experimentales utilizadas por los autores, la más común es la bomba cilíndrica, empleada por Hassan et al. [69], Sun et al. [56], Prathap et al. [61], Bouvet et al. [53], Singh et al. [59], Sikes et al. [57], Li et al. [25] y Li et al. [73]. La bomba cilíndrica con doble cámara fue utilizada por Burke et al. [74] y Ai et al. [71]; Natarajan et al. [60], Dong et al. [54] y Burbano et al. [62] se ayudaron de un mechero Bunsen; mientras que Zhang et al. [75] fueron los únicos en utilizar un quemador de flujo.



**Fig 4.9.** Comparación con los datos de la bibliografía de la velocidad de combustión laminar frente al dosado.  $50\%H_2 - 50\%CO$ ,  $Fr = 0.5-1$ ,  $p = 1$  bar,  $T = 300$  K.

A la vista de la figura, se comprueba que los resultados experimentales son muy similares a los de los autores, dando así validez a los mismos y a la metodología experimental. Es cierto que, para cada dosado, la velocidad de combustión laminar obtenida en el presente trabajo es ligeramente superior a la del resto de autores. Ello probablemente sea debido a que el rango de datos tomado en el presente trabajo para la obtención de la velocidad de combustión laminar en las condiciones de referencia, sea diferente al adoptado por el resto de autores.

### 4.3. Bomba Cilíndrica

En la bomba de combustión cilíndrica, ha sido posible realizar dos estudios paramétricos. El primero de ellos ha sido sobre los resultados de la presión que, al igual que en la bomba esférica, han sido procesados mediante el modelo de diagnóstico de dos zonas. Adicionalmente, un segundo estudio paramétrico ha sido posible gracias al análisis de las imágenes del proceso de combustión.

#### 4.3.1. Estudio Paramétrico: Resultados del modelo de diagnóstico de dos zonas

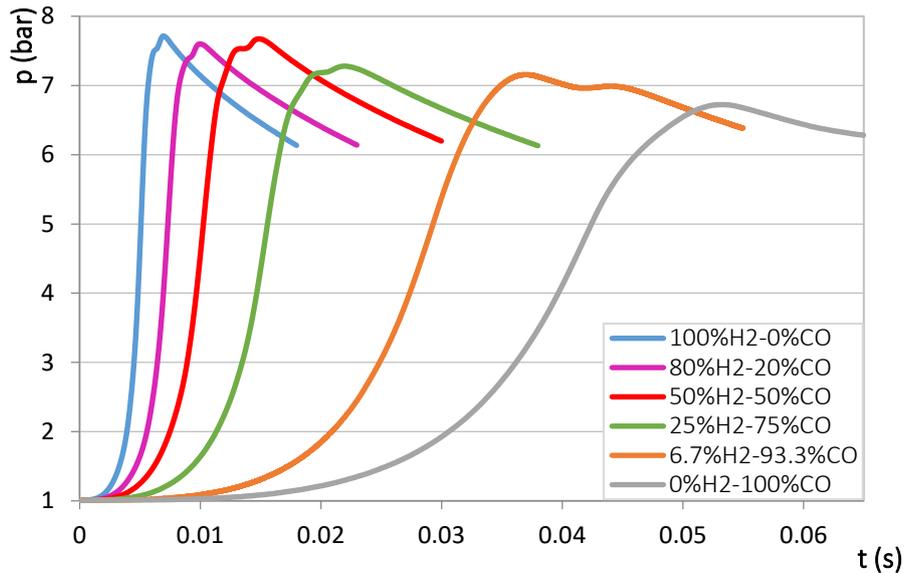
Nuevamente, se va a comprobar el efecto que tienen la composición y el dosado de la mezcla sobre la evolución de la presión y la velocidad de combustión, obtenidas mediante el modelo de diagnóstico de dos zonas.

##### 4.3.1.1. Influencia de la composición de la mezcla

Al igual que en el caso de la bomba esférica, para comprobar la influencia de la composición de la mezcla combustible sobre los parámetros de la combustión citados, se van a variar los porcentajes de hidrógeno (0, 6.7, 25, 50, 80 y 100%), mientras se mantienen constantes el dosado, que se tomará para todos los casos el estequiométrico, la presión y la temperatura, en 1 bar y 300 K, respectivamente.

##### 4.3.1.1.1. Presión

En la *Fig 4.10* se muestra la evolución temporal de la presión para las diferentes mezclas combustibles, para un dosado relativo igual a la unidad, a 1 bar y 300 K.

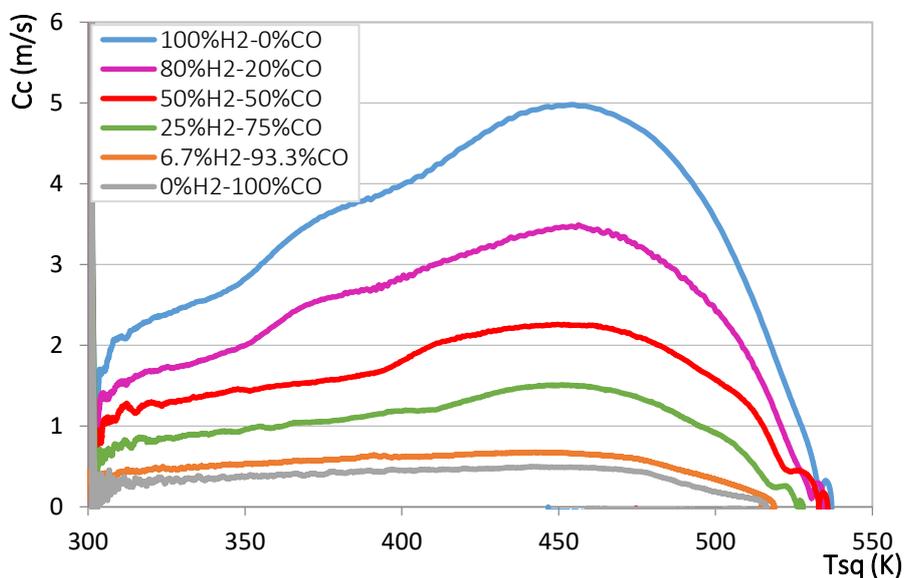


**Fig 4.10.** Influencia de la composición de la mezcla en la evolución de la presión frente al tiempo, en la bomba cilíndrica. %H<sub>2</sub> = 0, 6.7, 25, 50, 80 y 100%, Fr = 1, p = 1 bar, T = 300 K.

A la vista de los resultados, se deduce una clara tendencia en la que el incremento en el contenido de hidrógeno en la mezcla, implica unos picos de presión más elevados, y a su vez éstos se alcanzan en menores tiempos, al igual que ocurría en la bomba de combustión esférica.

#### 4.3.1.1.2. Velocidad de combustión

La velocidad de combustión frente a la temperatura de los inquemados, para las diferentes mezclas combustibles, todas ellas en las mismas condiciones, se ilustra en la Fig 4.11.



**Fig 4.11.** Influencia de la composición de la mezcla en la evolución de la velocidad de combustión laminar frente a la temperatura de la mezcla fresca, en la bomba cilíndrica. %H<sub>2</sub> = 0, 6.7, 25, 50, 80 y 100%, Fr = 1, p = 1 bar, T = 300 K.

Se puede observar, que la velocidad de combustión es directamente proporcional al contenido en hidrógeno de la mezcla, alcanzándose el valor máximo para el caso de H<sub>2</sub> puro, y el mínimo, lógicamente, para el caso de CO puro.

En las mezclas con menor contenido en hidrógeno (0 y 6.7%), la velocidad de combustión permanece prácticamente invariable a la temperatura de los inquemados (como muestran las respectivas curvas, prácticamente horizontales), es decir, se mantiene casi constante a lo largo de toda la combustión. Mientras, para el caso de las mezclas más ricas en hidrógeno, la velocidad de combustión aumenta a medida que se desarrolla el proceso, alcanzando su máximo para una temperatura de la mezcla fresca de unos 460 K, para después disminuir de forma abrupta hasta que el proceso de combustión finaliza.

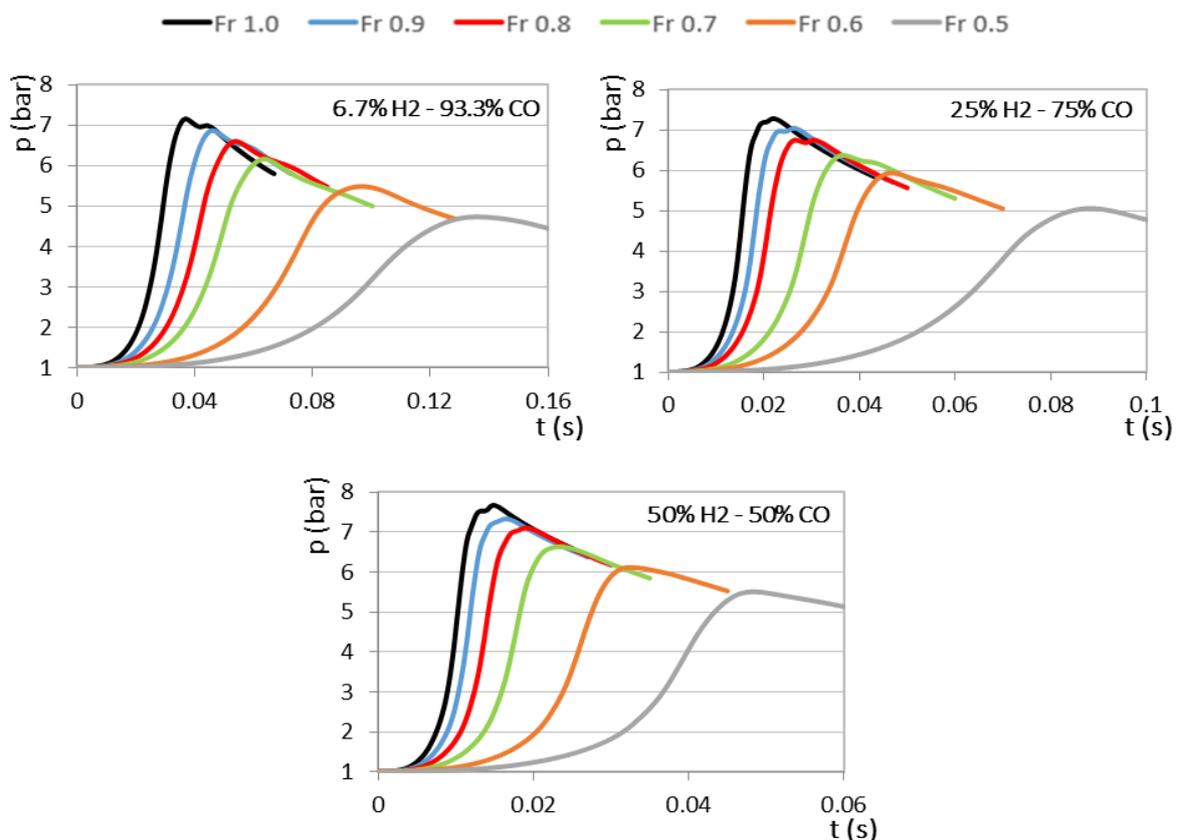
Además, y al igual que sucedía en la bomba cilíndrica, la temperatura máxima de la mezcla fresca aumenta ligeramente a medida que lo hace el contenido en hidrógeno del combustible, alcanzando, para hidrógeno puro, los 540 K, mientras que para CO puro no alcanza los 520 K.

#### 4.3.1.2. Influencia del dosado

Para las tres mezclas combustibles analizadas anteriormente, con contenidos de 6.7, 25 y 50% de hidrógeno, y en las mismas condiciones de presión y temperatura, se va a variar del dosado desde mezclas pobres, con dosado de 0.5, hasta mezclas estequiométricas, comprobando así la influencia del mismo sobre la presión y la velocidad de combustión.

##### 4.3.1.2.1. Presión

En la *Fig 4.12* se hace palpable que, a medida que aumenta el dosado de la mezcla también lo hacen las presiones alcanzadas. También, y al igual que ocurría en la bomba esférica, los picos de presión se alcanzan en menos tiempo, indicativo de una combustión más rápida, como era de esperar.



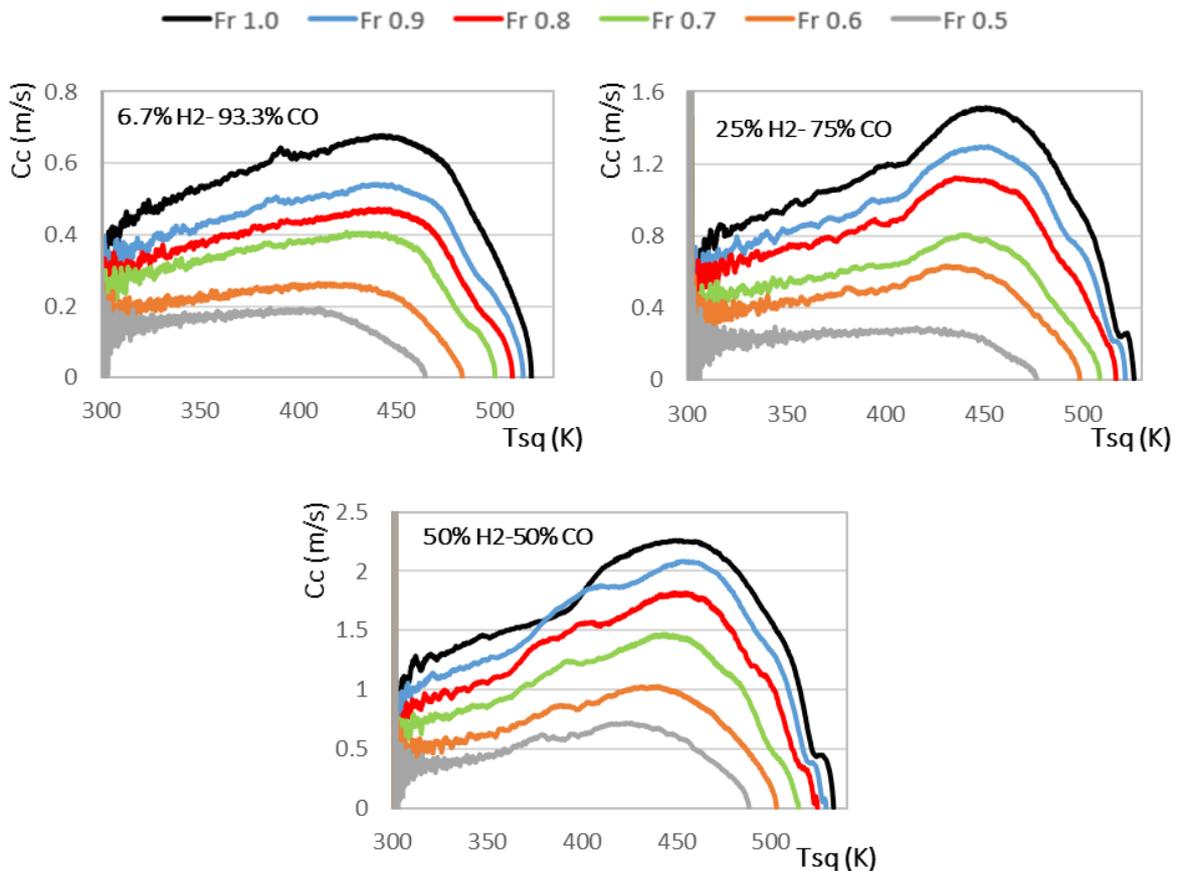
**Fig 4.12.** Influencia del dosado en la evolución de la presión frente al tiempo, en la bomba cilíndrica. 6.7% H<sub>2</sub> - 93.3% CO, 25% H<sub>2</sub> - 75% CO, 50% H<sub>2</sub> - 50% CO,  $Fr = 0.5 - 1$ ,  $p = 1$  bar,  $T = 300$  K.

Además, confirmando lo visto en el apartado anterior acerca de la influencia de la composición de la mezcla, se observa cómo el pico de presión para cada uno de los dosados, se alcanza en menos tiempo (combustión más rápida) a medida que aumenta el contenido en hidrógeno. Por ejemplo, para la mezcla de 6.7% de H<sub>2</sub> con dosado de 0.6, el pico de presión se alcanza en 0.1 s, mientras que el correspondiente a la mezcla de 50% de H<sub>2</sub>, se produce en apenas 0.03 s.

#### 4.3.1.2.2. Velocidad de combustión

Las representaciones de la velocidad de combustión frente a la temperatura de los inquemados, para las tres mezclas combustibles y con la variación de dosados, se resumen en la Fig 4.13.

De su análisis se extraen básicamente dos conclusiones. La primera y más importante, es que a medida que el dosado de la mezcla aumenta, también lo hace la velocidad de combustión. La otra observación es el incremento de la temperatura máxima de los inquemados a medida que aumenta el dosado.



**Fig 4.13.** Influencia del dosado en la evolución de la velocidad de combustión laminar frente a la temperatura de la mezcla fresca, en la bomba cilíndrica. 6.7% H<sub>2</sub> - 93.3% CO, 25% H<sub>2</sub> - 75% CO, 50% H<sub>2</sub> - 50% CO,  $Fr = 0.5 - 1$ ,  $p = 1$  bar,  $T = 300$  K.

Por lo tanto, al igual que se concluyó en la bomba esférica, el aumento de la concentración de hidrógeno en la mezcla y el dosado, tienen efectos similares en la velocidad de combustión, y es el de potenciarla e incrementarla. A modo de ejemplo, la velocidad de combustión, en las condiciones de referencia, para la mezcla con un 25% de H<sub>2</sub> y dosado de 0.7, es aproximadamente la misma que para la mezcla con 6.7% de H<sub>2</sub> y dosado 1, de unos 0.4 m/s.

Precisamente aquí es donde radica el interés de enriquecer la mezcla combustible con hidrógeno, ya que permite reducir los dosados de operación en el motor, consiguiendo así reducir el consumo de combustible y las emisiones contaminantes.

### 4.3.2. Estudio Paramétrico: Análisis de las imágenes

Mediante el análisis de las imágenes obtenidas del proceso de combustión en la bomba cilíndrica, se ha realizado un estudio paramétrico en el que se analiza la influencia de la composición y el dosado de la mezcla, sobre la morfología de la llama, la evolución del radio del frente de llama o la velocidad de propagación del mismo, así como la velocidad de combustión laminar.

#### 4.3.2.1. Influencia de la composición de la mezcla

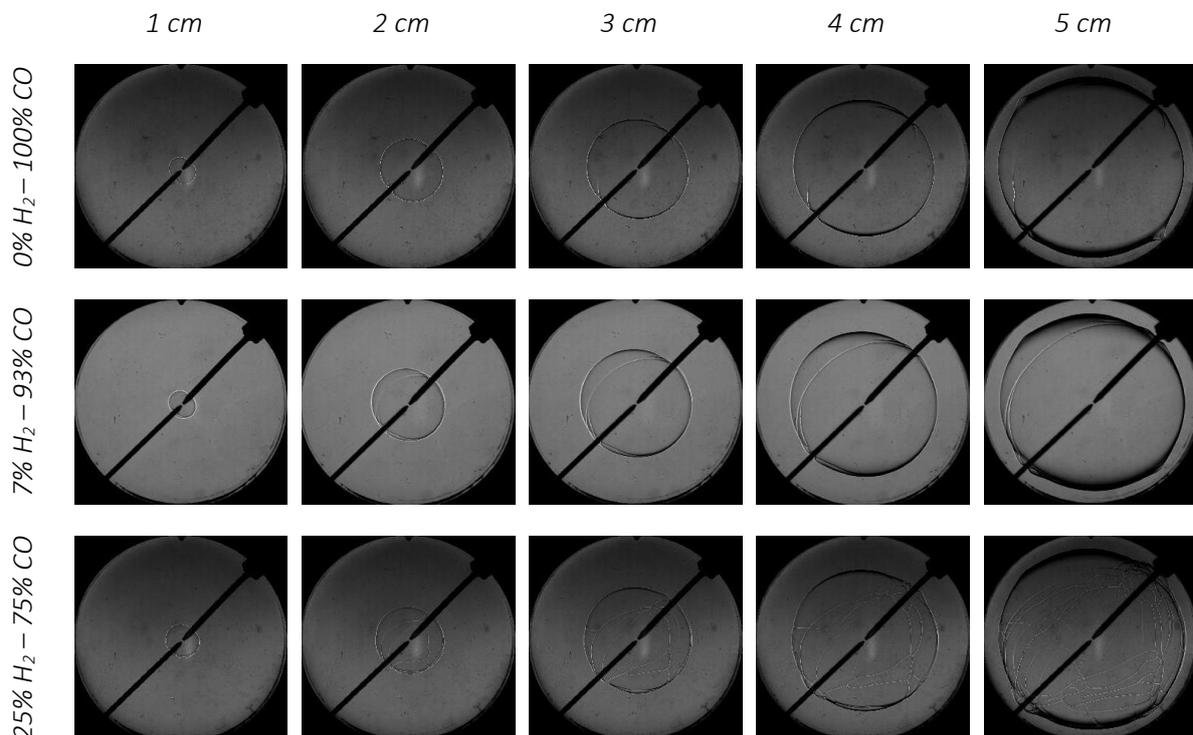
Una vez más, variando la cantidad de hidrógeno en la mezcla  $H_2$ -CO, y manteniendo fijos el resto de parámetros (dosado estequiométrico, 1 bar y 300 K), se va a estudiar la influencia de la composición de dicha mezcla en los diferentes parámetros de la combustión analizados.

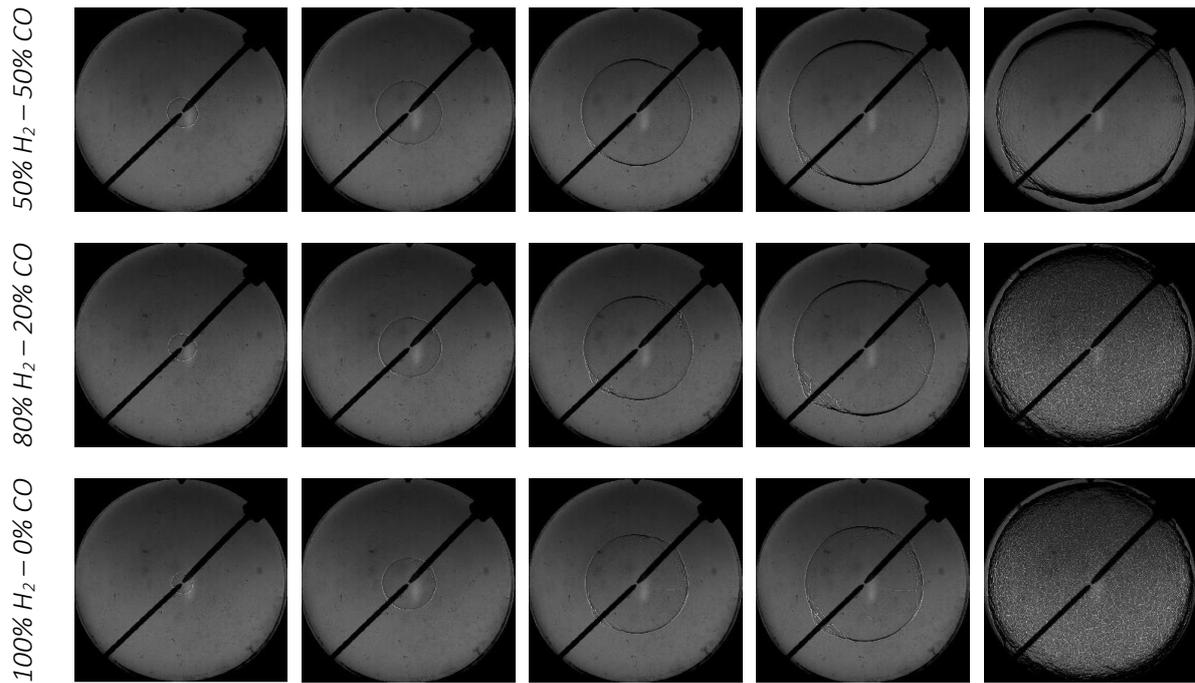
##### 4.3.2.1.1. Morfología de la llama

En la Fig 4.14 se muestran las diferentes imágenes Schlieren de las combustiones realizadas, en forma de matriz composición de la mezcla – radio del frente de llama.

Visualizando las imágenes horizontalmente, se aprecia la evolución del radio del frente de llama a medida que transcurre la combustión, para una composición dada. En el caso de observar las imágenes de forma vertical, se podrá visualizar la influencia de la composición de la mezcla en la morfología de la llama, para un radio dado.

En primer lugar, y antes de entrar a valorar los resultados de las imágenes, se ha de destacar la esfericidad de las diferentes llamas, comprobando así que se satisface la hipótesis realizada en el modelo de diagnóstico de dos zonas.





**Fig 4.14.** Evolución de las imágenes Schlieren, para diferentes radios de llama al variar la composición de la mezcla, en la bomba cilíndrica. 0% H<sub>2</sub> - 100% CO, 6.7% H<sub>2</sub> - 93.3% CO, 25% H<sub>2</sub> - 75% CO, 50% H<sub>2</sub> - 50% CO, 80% H<sub>2</sub> - 20% CO, 100% H<sub>2</sub> - 0% CO,  $Fr = 1$ ,  $p = 1$  bar,  $T = 300$  K.

Del análisis de la figura se desprende que, el incremento del contenido en H<sub>2</sub> de la mezcla implica un aumento de las arrugas o células en la superficie del frente de llama, indicativo de una mayor inestabilidad de la misma. Esto se aprecia claramente en las llamas con radio de 5 cm, donde las mezclas con un bajo contenido en hidrógeno (0 y 6.7%) presentan una superficie de llama completamente lisa o laminar; mientras, las mezclas con alto contenido en hidrógeno (80 y 100%), presentan llamas con una superficie considerablemente arrugada o celular.

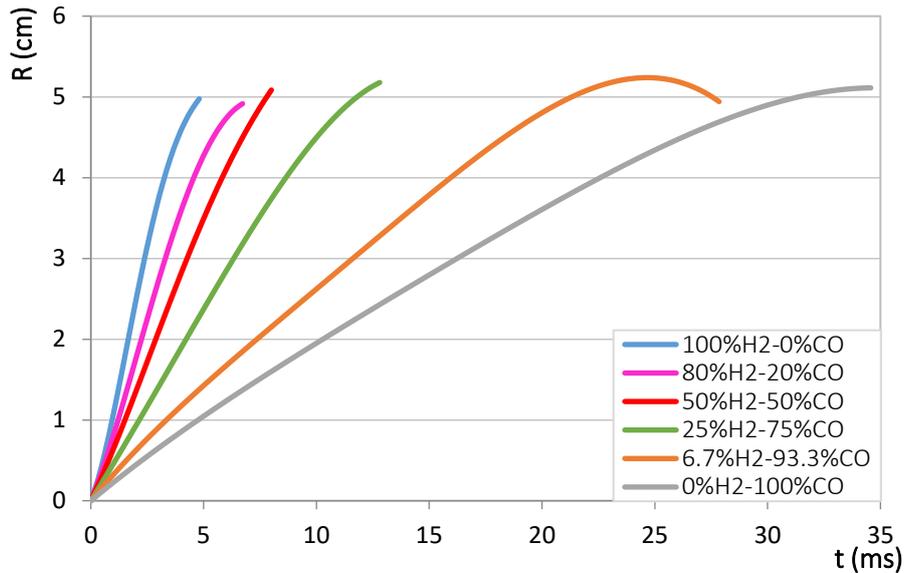
Atendiendo a la evolución del radio de las llamas se muestra que, todas las mezclas, independientemente de su composición, comienzan su propagación con llamas completamente laminares. Posteriormente, a medida que el frente de llama crece, se incrementa el arrugamiento del mismo. Este último efecto se visualiza claramente para las mezclas con mayor contenido en hidrógeno (80 y 100%), y para los mayores tamaños de llama (4 y 5 cm).

En definitiva, se puede concluir que el contenido en hidrógeno de la mezcla combustible favorece la celularidad de la llama y, con ésta, la inestabilidad de la misma.

#### 4.3.2.1.2. Radio del Frente de Llama

En la Fig 4.15 se recoge la evolución temporal del radio del frente de llama para las diferentes composiciones de la mezcla combustible.

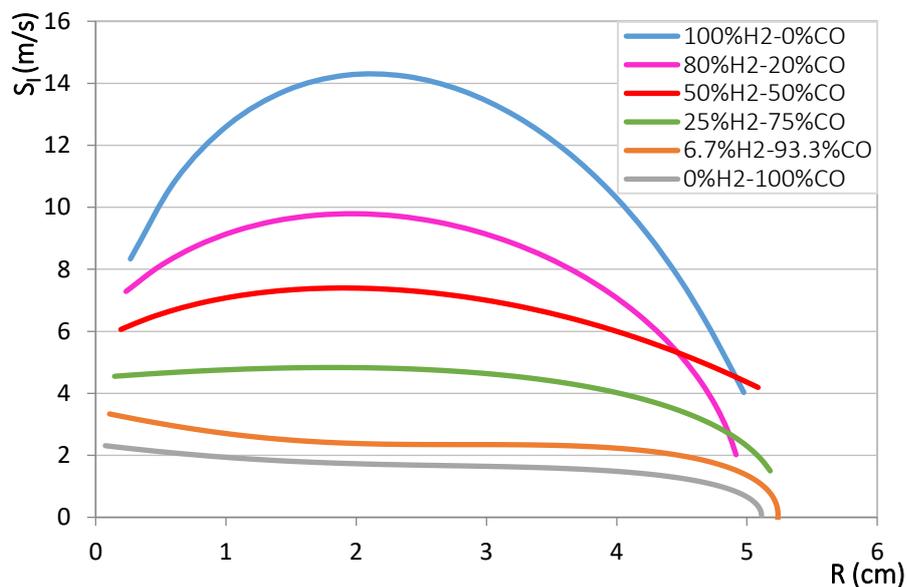
Se observa cómo el contenido en hidrógeno de la mezcla favorece un crecimiento más rápido de la llama, ya que éstas alcanzan sus radios máximos en tiempos menores.



**Fig 4.15.** Evolución del radio del frente de llama respecto al tiempo, en la bomba cilíndrica. %  $H_2 = 0, 6.7, 25, 50, 80$  y  $100\%$ ,  $Fr = 1$ ,  $p = 1$  bar,  $T = 300$  K.

4.3.2.1.3. Velocidad de Propagación de Llama

La variación temporal del radio del frente de llama, como ya se ha comentado con anterioridad, equivale a la velocidad de propagación del mismo. Representando esta velocidad de propagación, respecto al radio del propio frente de llama, se obtienen curvas como las incluidas en la Fig 4.16.



**Fig 4.16.** Evolución de la velocidad de propagación del frente de llama respecto al radio del mismo, en la bomba cilíndrica. %  $H_2 = 0, 6.7, 25, 50, 80$  y  $100\%$ ,  $Fr = 1$ ,  $p = 1$  bar,  $T = 300$  K.

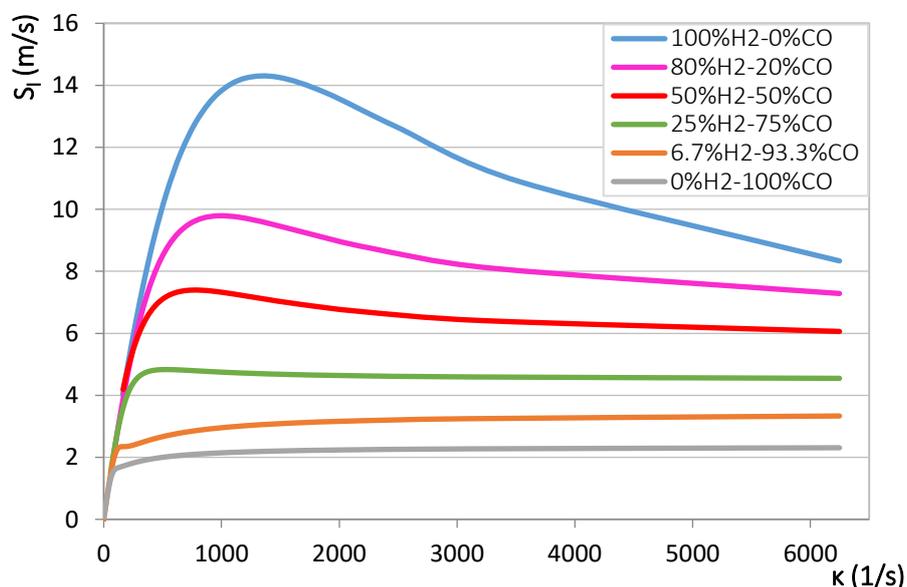
Del análisis de la figura, se desprende que la velocidad de propagación se ve favorecida por el contenido en hidrógeno del combustible.

Además, para las mezclas más ricas en hidrógeno, la velocidad de propagación va aumentando a medida que crece el radio, es decir, según se va desarrollando la combustión. Estas mezclas alcanzan el pico de la velocidad de propagación para radios ligeramente superiores a los 2cm,

para acabar reduciéndose a medida que el frente se va aproximando a la pared de la cámara de combustión. Por su parte, las mezclas más pobres en hidrógeno presentan el pico de la velocidad de propagación en el mismo instante del inicio de la llama, para posteriormente disminuir ligeramente y mantenerse prácticamente constante hasta la extinción de la misma.

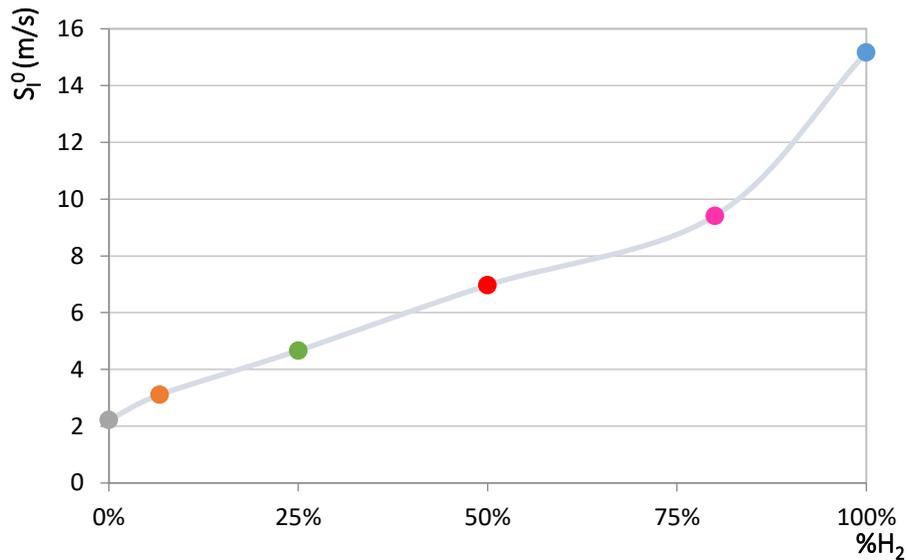
En el caso de representar la velocidad de propagación de la llama frente a la tasa de stretch, se obtienen unas curvas muy características, mostradas en la *Fig 4.17*. Estas curvas tienen, para todas las composiciones, un primer tramo en el que la velocidad de propagación aumenta de forma significativamente con la tasa de stretch. En el tramo final de todas ellas, se aprecia que la velocidad de propagación se hace independiente de la tasa de stretch o arrugamiento del frente, ya que las curvas se hacen prácticamente horizontales.

Es interesante ver que, para una misma tasa de stretch, la velocidad de propagación aumenta con el contenido en hidrógeno de la mezcla. Además, el enriquecimiento en hidrógeno de la mezcla, hace que los picos de la velocidad de propagación se alcancen para tasas de stretch más elevadas.



**Fig 4.17.** Evolución de la velocidad de propagación del frente de llama respecto a la tasa de stretch, en la bomba cilíndrica. %H<sub>2</sub> = 0, 6.7, 25, 50, 80 y 100%, Fr = 1, p = 1 bar, T = 300 K.

Como se ha comentado en el apartado de tratamiento de las imágenes, si se prolonga el tramo final de la gráfica anterior, en el que la velocidad de propagación se va haciendo independiente del stretch, el punto de proyección en el eje de ordenadas representa la velocidad de propagación laminar sin stretch,  $S_l^0$ . Ésta se ha representado, frente a la fracción de hidrógeno contenida en la mezcla, en la *Fig 4.18*.



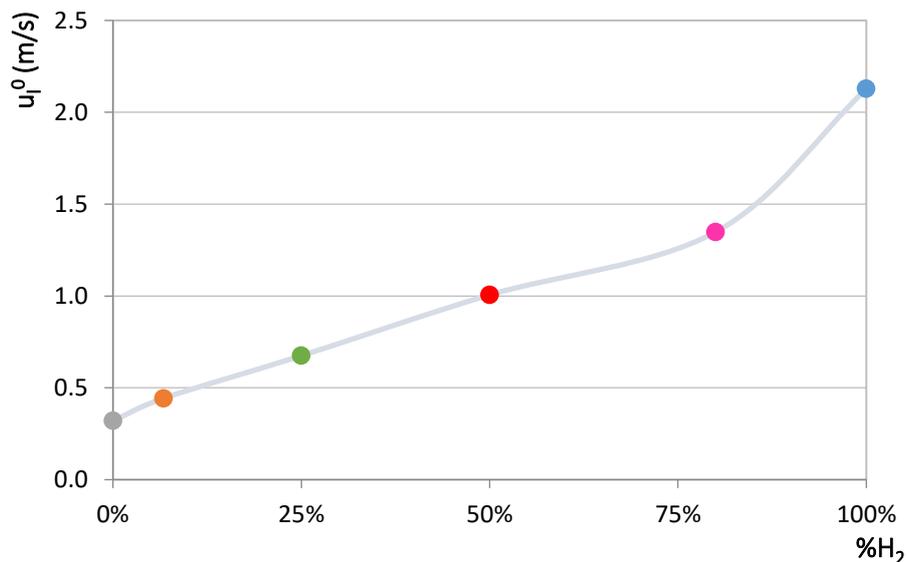
**Fig 4.18.** Influencia de la fracción de hidrógeno de la mezcla en la velocidad de propagación de la llama sin stretch, en la bomba cilíndrica. %H<sub>2</sub> = 0, 6.7, 25, 50, 80 y 100%, Fr = 1, p = 1 bar, T = 300 K.

Finalmente, y como ya se ha comentado, multiplicando el valor de la velocidad de propagación laminar sin stretch por el cociente de densidades de la mezcla quemada y sin quemar, se obtiene la velocidad de combustión laminar sin stretch,  $u_l^0$ .

#### 4.3.2.1.4. Velocidad de combustión laminar

Representada la velocidad de combustión laminar sin stretch frente a la fracción de hidrógeno de la mezcla, en la Fig 4.19, se observa la relación directamente proporcional que experimentan.

Como ya se había afirmado anteriormente, el hidrógeno es un potenciador de la combustión, y un incremento del contenido de éste en la mezcla hace aumentar la velocidad de combustión laminar.



**Fig 4.19.** Influencia de la fracción de hidrógeno de la mezcla en la velocidad de combustión laminar, en la bomba cilíndrica. %H<sub>2</sub> = 0, 6.7, 25, 50, 80 y 100%, Fr = 1, p = 1 bar, T = 300 K.

#### 4.3.2.2. Influencia del dosado

Una vez más, y como parte del estudio paramétrico del análisis de las imágenes, se ha variado el dosado, de 0.5 a 1, manteniendo constantes la presión y la temperatura, para cada una de las tres mezclas (6.7, 25 y 50% H<sub>2</sub>) analizadas.

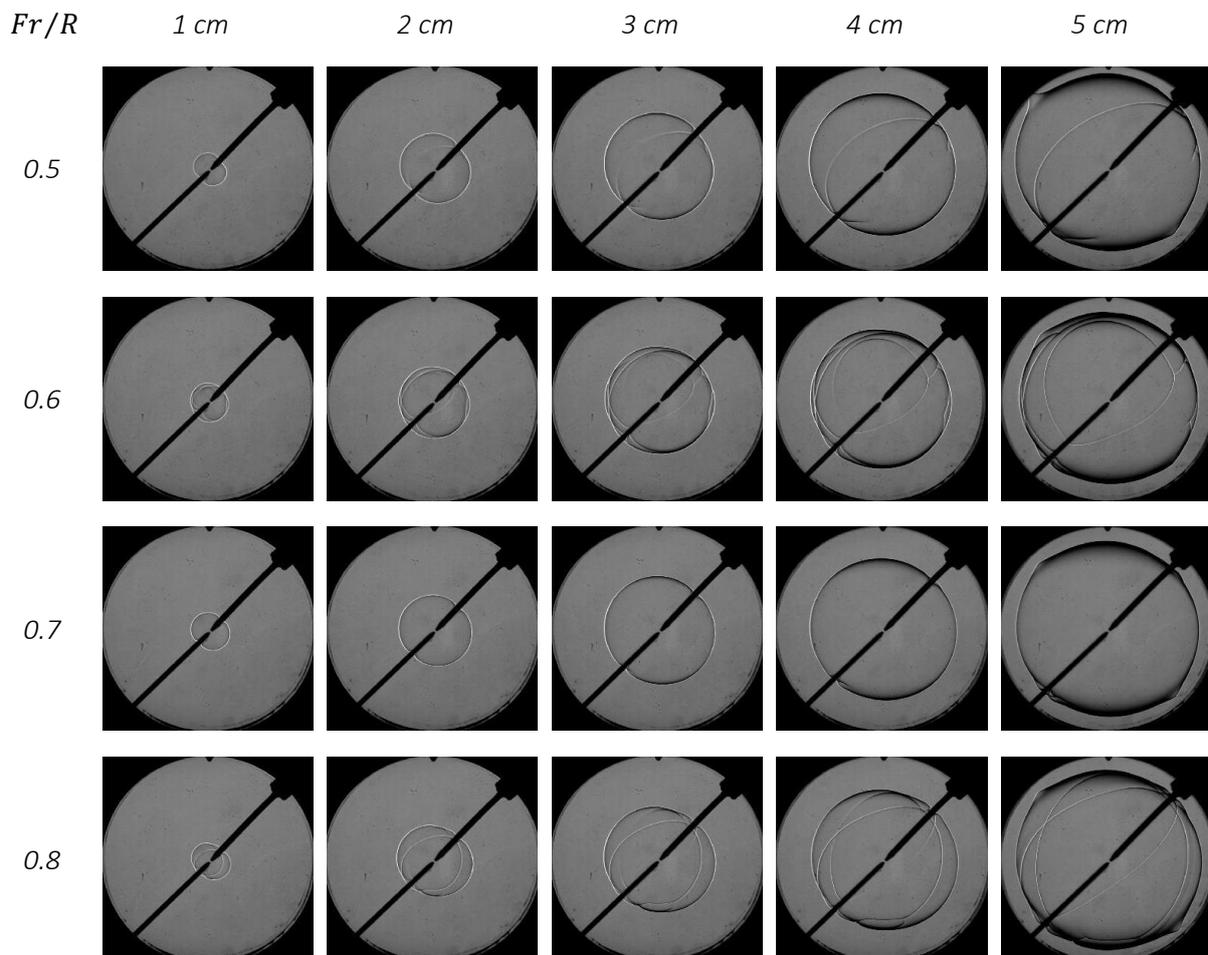
##### 4.3.2.2.1. Morfología de la llama

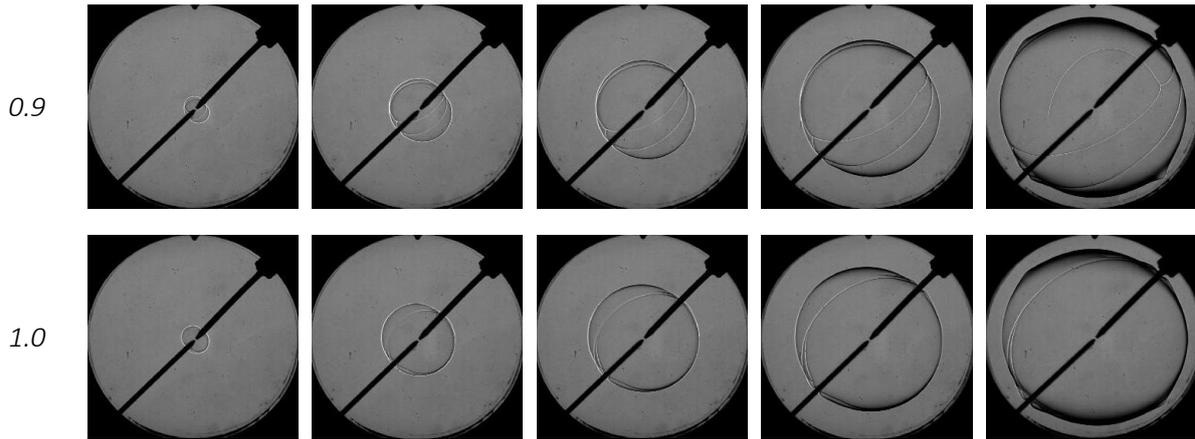
En el análisis sobre la influencia de la composición en la morfología de la llama, se ha concluido que el hidrógeno tiene un efecto desestabilizador en la llama, haciendo que la superficie de la misma tienda a la celularidad.

Para comprobar el efecto que tiene el dosado sobre la morfología de las llamas, en las Fig 4.20, Fig 4.21 y Fig 4.22 se ha representado en forma de matriz, el dosado frente al radio del frente de llama, para las mezclas de 6.7%, 25% y 50% de H<sub>2</sub>, respectivamente.

Analizando las imágenes Schlieren horizontalmente, se puede observar la evolución del frente de llama para un mismo dosado, y comprobar así la evolución que presenta una misma llama a lo largo del proceso de combustión.

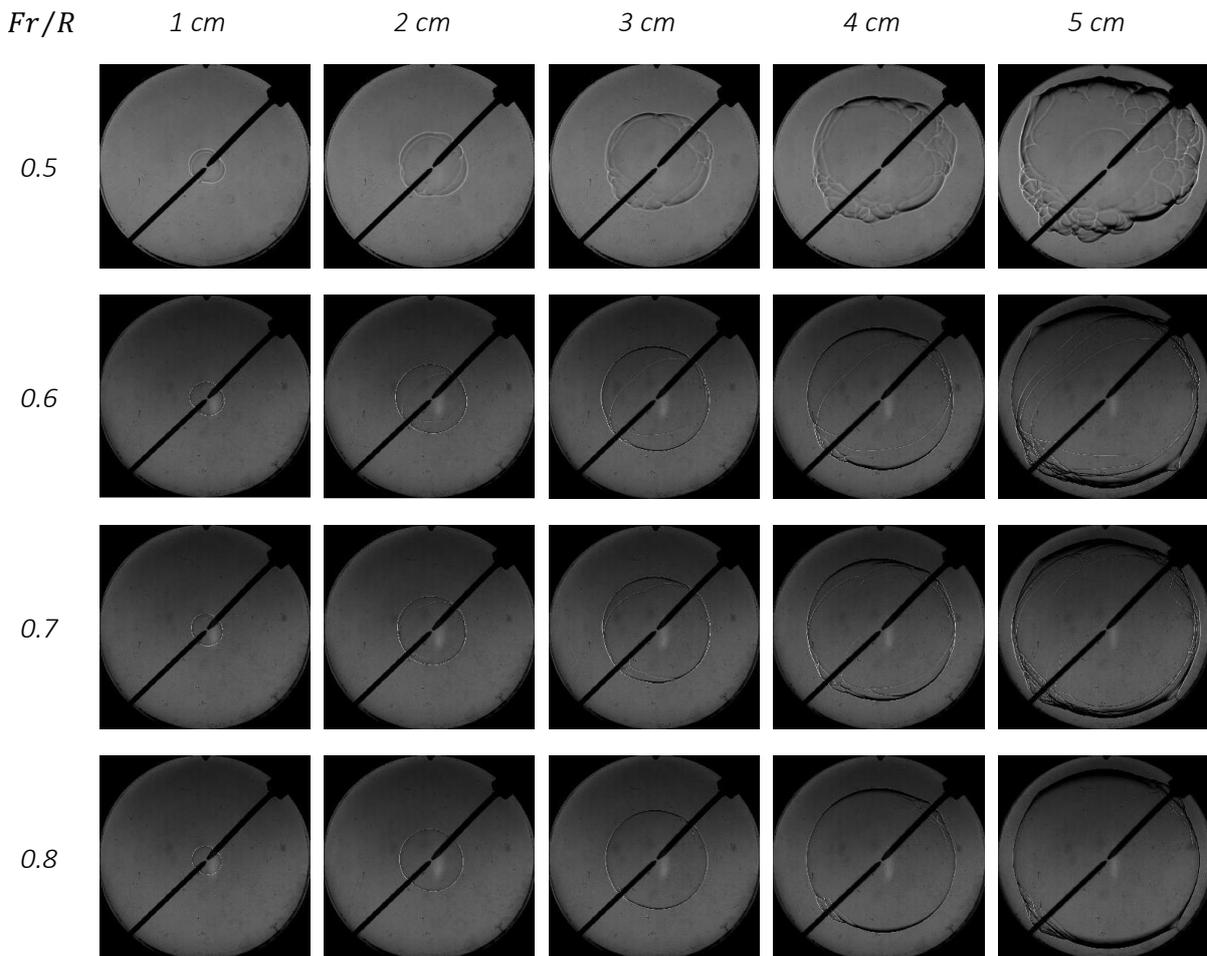
Por su parte, mediante un análisis vertical, se puede comprobar la influencia que tiene el dosado en la morfología de la llama, para un mismo tamaño o radio del frente.

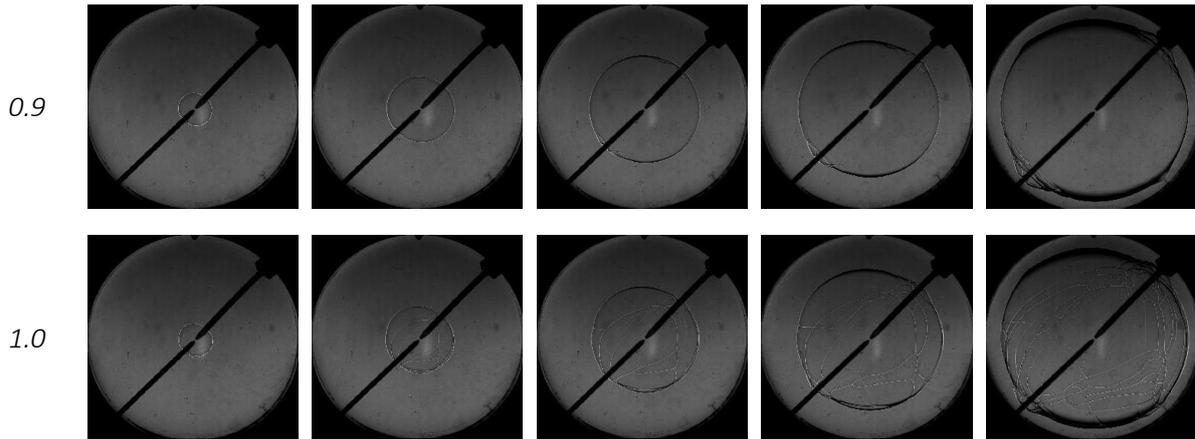




**Fig 4.20.** Evolución de las imágenes Schlieren, para diferentes radios de llama al variar el dosado, en la bomba cilíndrica. 6.7%  $H_2$  – 93.3%  $CO$ ,  $Fr = 0.5-1$ ,  $p = 1$  bar,  $T = 300$  K.

A la vista de las imágenes de la Fig 4.20 se muestra que, para la mezcla combustible con un 6.7% de  $H_2$ , no se produce la aparición de inestabilidades o celularidad en la superficie de la llama, para ninguno de los dosados analizados. Ello es indicativo de que el contenido en hidrógeno no es lo suficientemente alto como para que primen sus efectos tendentes a la inestabilidad de la llama. A su vez, se puede afirmar que el monóxido de carbono, componente mayoritario en la mezcla, presenta unas llamas con una superficie completamente lisa y estable.



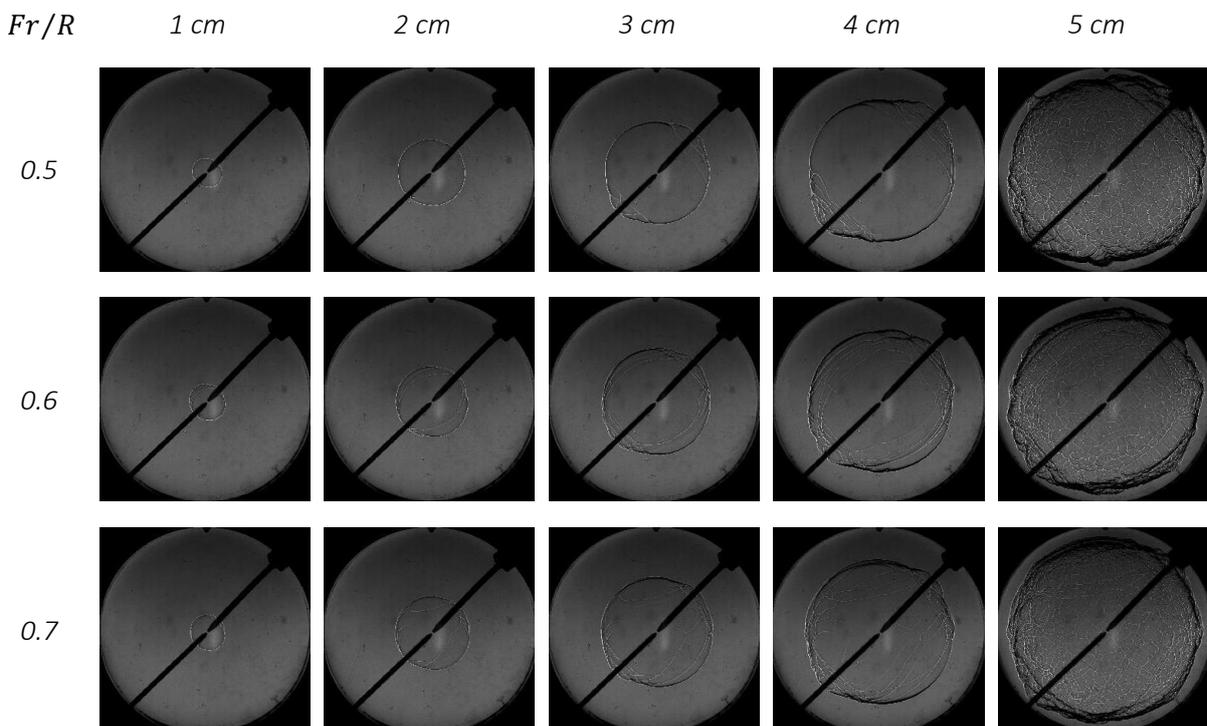


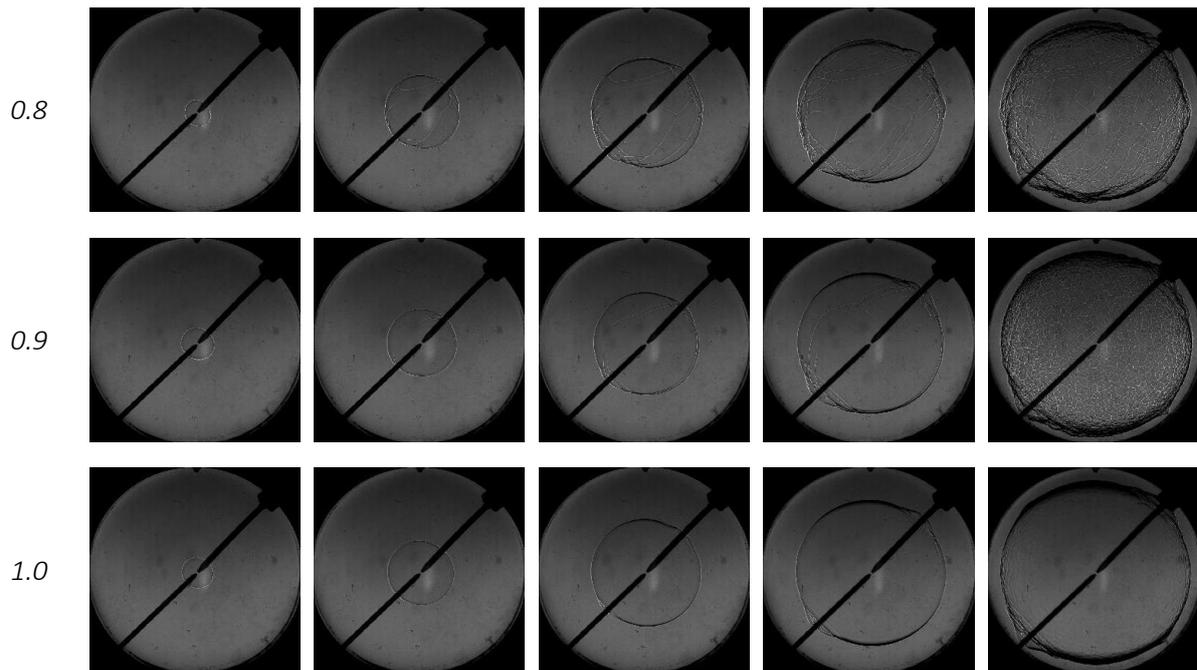
**Fig 4.21.** Evolución de las imágenes Schlieren, para diferentes radios de llama al variar el dosado, en la bomba cilíndrica.  $25\% \text{H}_2 - 75\% \text{CO}$ ,  $Fr = 0.5-1$ ,  $p = 1 \text{ bar}$ ,  $T = 300 \text{ K}$ .

Atendiendo a las imágenes de la Fig 4.21, se empieza a apreciar el efecto del hidrógeno sobre la morfología de llama, de modo que a medida que disminuye el dosado, la superficie de la llama se va volviendo más celular e inestable.

Destaca sobre el resto de las imágenes la de dosado igual a 0.5, que por ser el dosado más bajo de los analizados, es el que más inestabilidad presenta como consecuencia del hidrógeno, a raíz de lo afirmado en el párrafo anterior.

Además, para este mismo dosado, y principalmente para los radios de llama de 4 y 5 cm, se aprecia el fenómeno de inestabilidad debido a las fuerzas de volumen. Éste, como se introdujo en el apartado correspondiente del estado del arte, es motivado por la diferencia de densidades entre la mezcla fresca y los gases quemados, dando esa sensación de flotabilidad en la llama. Este fenómeno, además, es evidente únicamente en los casos en los que la velocidad de combustión laminar es baja, precisamente como aquí sucede.





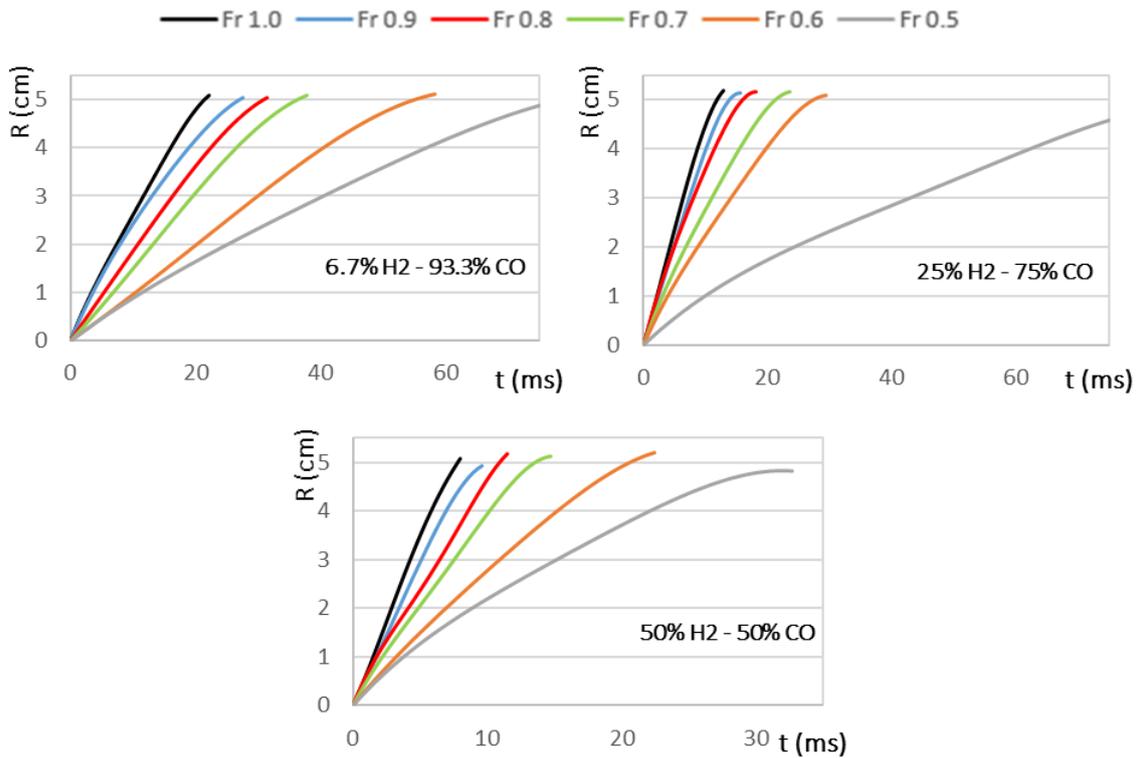
**Fig 4.22.** Evolución de las imágenes Schlieren, para diferentes radios de llama al variar el dosado, en la bomba cilíndrica.  $50\% \text{H}_2 - 50\% \text{CO}$ ,  $Fr = 0.5-1$ ,  $p = 1 \text{ bar}$ ,  $T = 300 \text{ K}$ .

Ya con una cantidad de hidrógeno importante en la mezcla, del 50%, en la Fig 4.22 se aprecia claramente el efecto inestabilizador del mismo. Siendo muy representativo para las llamas de 5 cm de radio, se puede afirmar que la rugosidad e inestabilidad de la superficie de las mismas se ve incrementada con la disminución del dosado de operación, como ya se observó para la mezcla con un 25% de hidrógeno. Además, también en este caso, las llamas en el inicio de su propagación presentan una superficie lisa, y a medida que la llama crece de tamaño va adquiriendo una superficie más irregular.

#### 4.3.2.2.2. Radio del Frente de Llama

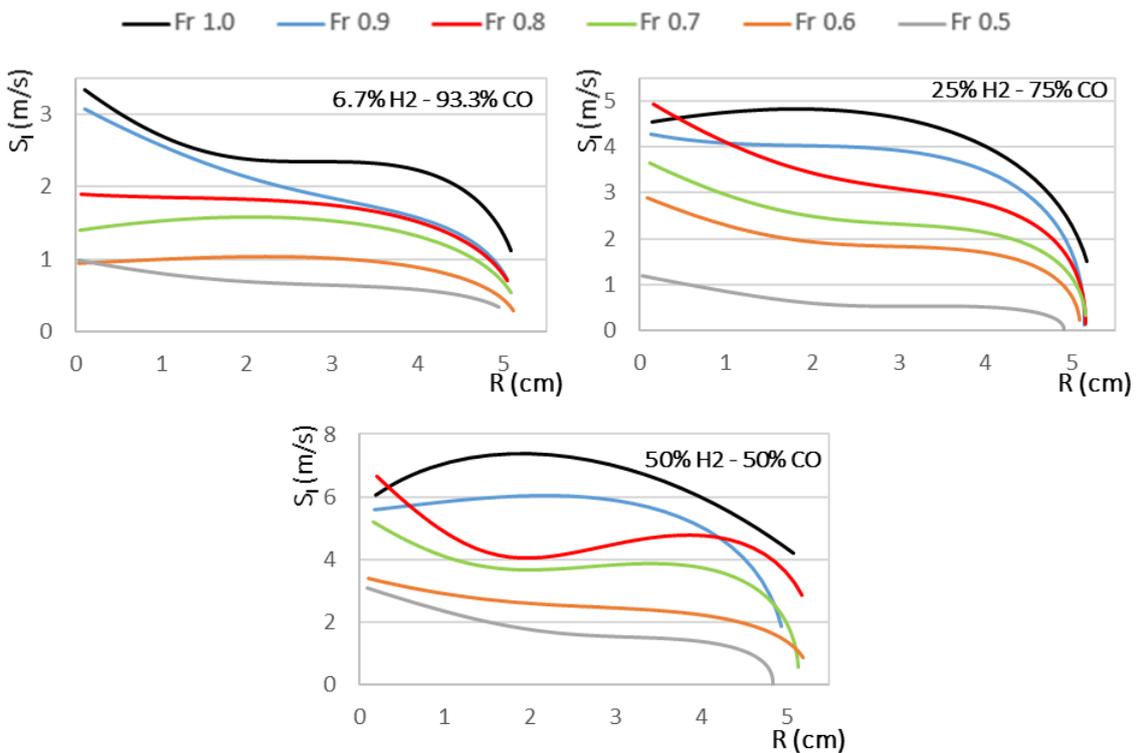
En cuanto a la evolución temporal del radio del frente de llama, mostrada en la Fig 4.23, se puede afirmar que al aumento del dosado de la mezcla hace que el frente de llama se propague a mayor velocidad, como era lógico suponer.

Dentro de las curvas pertenecientes a la mezcla de  $25\% \text{H}_2 - 75\% \text{CO}$ , destaca la correspondiente al dosado de 0.5, por lo mucho que difiere de las del resto de dosados. Ésta, corresponde con la que se mencionó en el apartado anterior de morfología de la llama, que experimentaba una gran celularidad, además del fenómeno de inestabilidad por fuerzas de volumen. Es por estos motivos por los que la evolución del frente de llama se produce de forma mucho más lenta que la del resto de dosados.



**Fig 4.23.** Influencia del dosado en la evolución del radio del frente de llama respecto al tiempo, en la bomba cilíndrica. 6.7% H<sub>2</sub> - 93.3% CO, 25% H<sub>2</sub> - 75% CO, 50% H<sub>2</sub> - 50% CO,  $Fr = 0.5 - 1$ ,  $p = 1$  bar,  $T = 300$  K.

4.3.2.2.3. Velocidad de Propagación de Llama



**Fig 4.24.** Influencia del dosado en la evolución de la velocidad de propagación del frente de llama respecto al radio del mismo, en la bomba cilíndrica. 6.7% H<sub>2</sub> - 93.3% CO, 25% H<sub>2</sub> - 75% CO, 50% H<sub>2</sub> - 50% CO,  $Fr = 0.5 - 1$ ,  $p = 1$  bar,  $T = 300$  K.

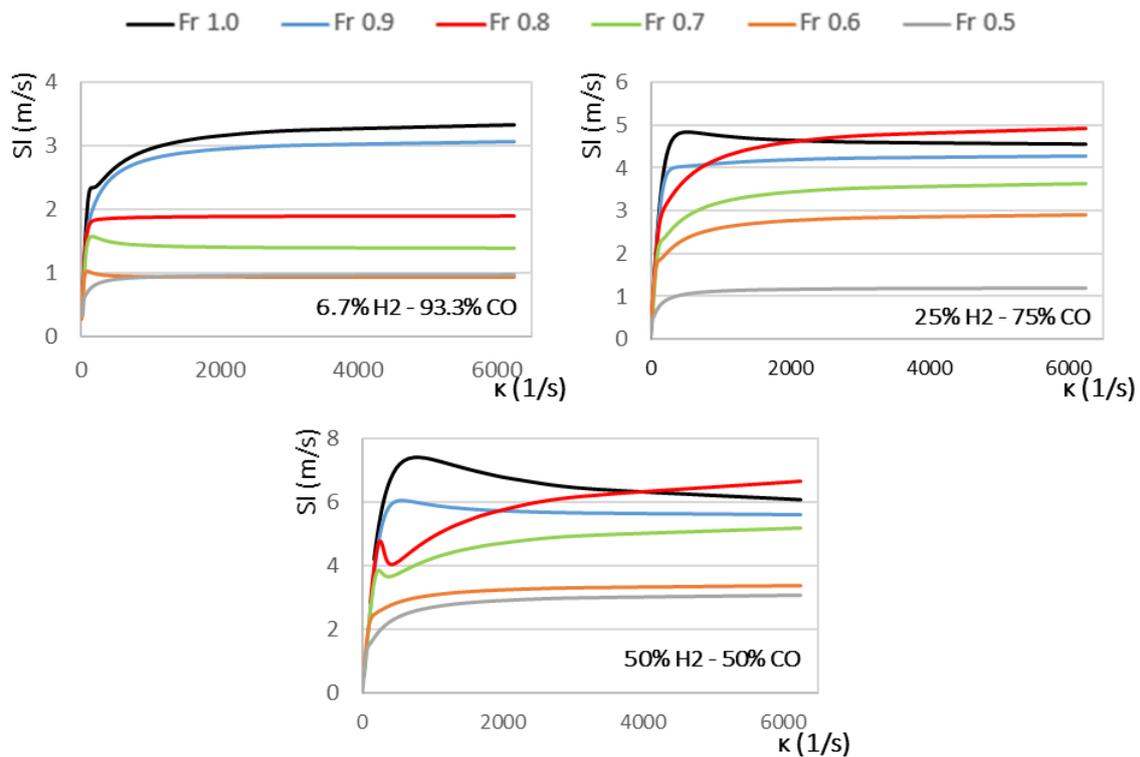
De la representación de la velocidad de propagación respecto al radio del frente de llama, se puede deducir que para un mismo tamaño del frente de llama, la velocidad de propagación aumenta a medida que lo hace el dosado.

En general, para los diferentes dosados y mezclas, la máxima velocidad de propagación se da para el menor tamaño de llama, cuando está empezando a propagarse. Esta velocidad va disminuyendo de forma paulatina hasta que el frente de llama choca contra las paredes de la cámara y se extingue.

La misma tendencia se observa en la representación de la velocidad de propagación respecto a la tasa de stretch, mostrada en la *Fig 4.24*. A medida que aumenta el dosado relativo, para una misma tasa de stretch o estiramiento de la llama, la velocidad de propagación se ve incrementada.

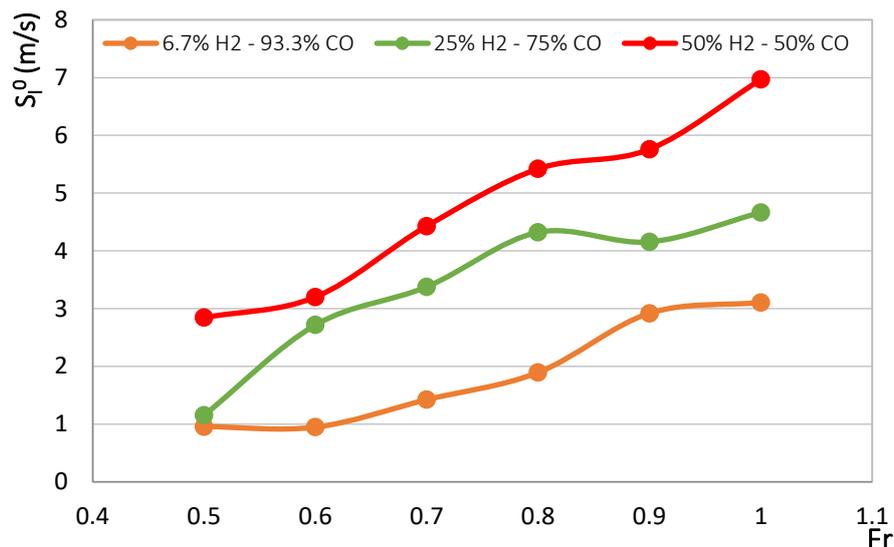
Estas curvas también presentan un primer tramo en el que la velocidad de propagación aumenta enérgicamente con la tasa de stretch, y un tramo final en el que la velocidad apenas depende del estiramiento de la llama.

Hay que tener en cuenta que, el tramo final de estas curvas, correspondiente a las tasas de stretch más elevadas, hace referencia al inicio de la propagación de la llama, es decir, el inicio del frente de llama conlleva las mayores tasas de stretch, y a medida que aumenta de radio, este estiramiento disminuye.



**Fig 4.25.** Influencia del dosado en la evolución de la velocidad de propagación del frente de llama respecto a la tasa de stretch, en la bomba cilíndrica. 6.7% H<sub>2</sub> - 93.3% CO, 25% H<sub>2</sub> - 75% CO, 50% H<sub>2</sub> - 50% CO, Fr = 0.5 - 1, p = 1 bar, T = 300 K.

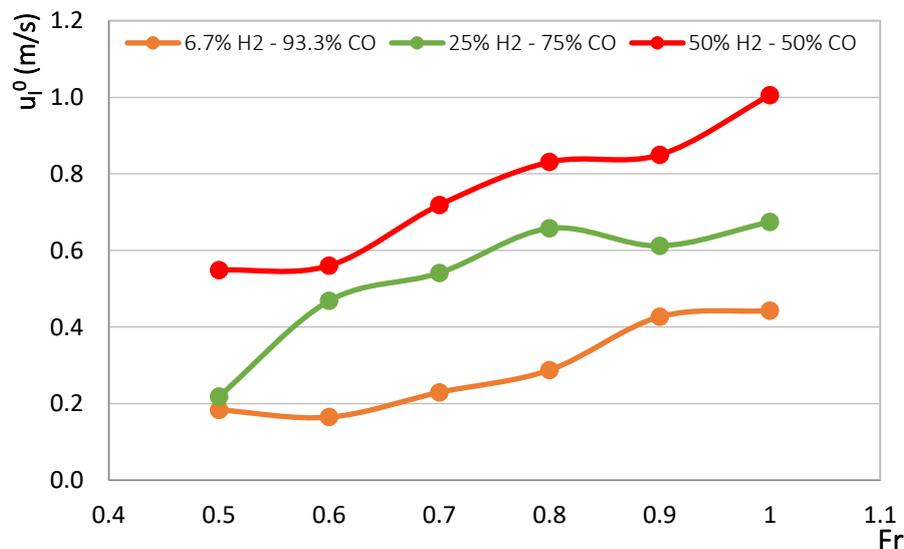
Una vez más, se obtiene la velocidad de propagación laminar sin stretch, mediante la proyección sobre el eje de ordenadas de la parte de las curvas en las que la  $S_1$  se hace prácticamente independiente del estiramiento.



**Fig 4.26.** Influencia del dosado en la velocidad de propagación de la llama sin stretch, en la bomba cilíndrica. 6.7% H<sub>2</sub> - 93.3% CO, 25% H<sub>2</sub> - 75% CO, 50% H<sub>2</sub> - 50% CO,  $Fr = 0.5 - 1$ ,  $p = 1$  bar,  $T = 300$  K.

#### 4.3.2.2.4. Velocidad de combustión laminar

Finalmente, y para terminar con el estudio paramétrico sobre el análisis de las imágenes de la bomba de combustión cilíndrica, se presenta en la Fig 4.27 la evolución de la velocidad de combustión laminar sin efectos de stretch frente al dosado.



**Fig 4.27.** Influencia del dosado en la velocidad de combustión laminar, en la bomba cilíndrica. 6.7% H<sub>2</sub> - 93.3% CO, 25% H<sub>2</sub> - 75% CO, 50% H<sub>2</sub> - 50% CO,  $Fr = 0.5 - 1$ ,  $p = 1$  bar,  $T = 300$  K.

Se observa claramente el aumento de la velocidad de combustión laminar a medida que se incrementa el dosado relativo. Además, con esta gráfica, se puede también comprobar la influencia combinada de la composición de la mezcla y del dosado. Se aprecia que, a medida que aumenta el contenido en hidrógeno de la mezcla, la pendiente media de la curva se hace más pronunciada. Esto implica que, por ejemplo, un aumento de dosado de 0.7 a 0.8 en una mezcla con 50% H<sub>2</sub> - 50% CO, tiene un incremento en la velocidad de combustión laminar mayor que una mezcla con 6.7% H<sub>2</sub> - 93.3% CO, con el mismo aumento de dosado.

## 4.4. Comparación entre las bombas esférica y cilíndrica

Una vez se han visto los resultados obtenidos en las bombas de combustión esférica y cilíndrica, resulta interesante hacer una comparación entre ambas. De este modo se podrán extraer las conclusiones oportunas acerca de la influencia de la geometría de las mismas en el desarrollo del proceso de combustión.

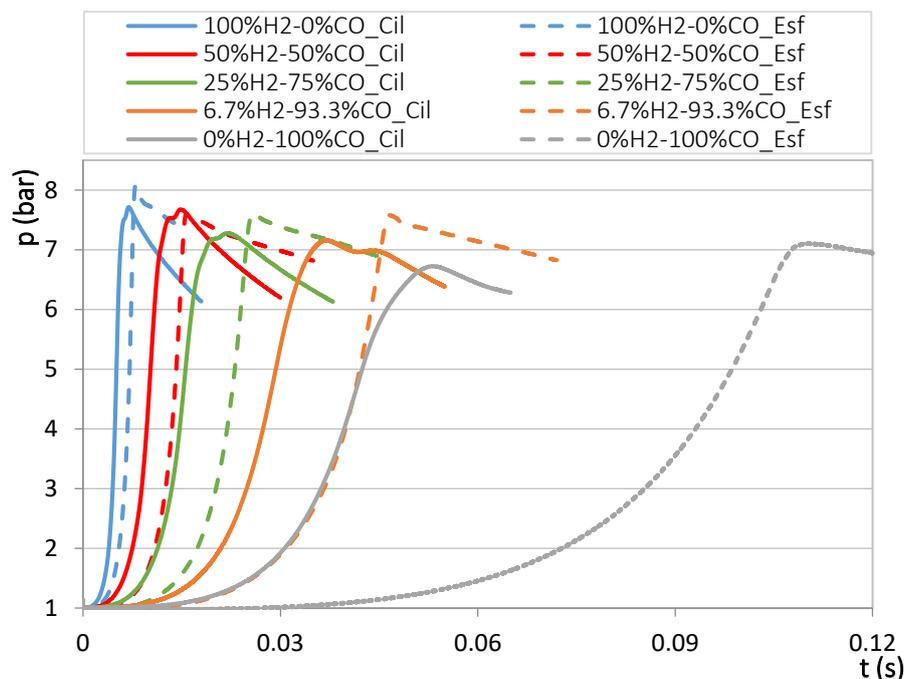
Siguiendo la línea del presente trabajo, la comparación entre ambas bombas de combustión se va a realizar teniendo en cuenta la influencia de la composición de la mezcla y el dosado relativo.

### 4.4.1. Influencia de la composición de la mezcla

Se va a variar la composición de las mezclas combustibles  $H_2$ -CO, con contenidos de 0, 6.7, 25, 50 y 100 % de hidrógeno, manteniendo fijo el dosado, en el estequiométrico, y las presiones y temperaturas en 1 bar y 300 K, respectivamente.

#### 4.4.1.1. Presión

En la Fig 4.28 se han reunido las curvas de presión, para ambas bombas, de las diferentes mezclas combustibles.



**Fig 4.28.** Comparación entre la evolución de la presión respecto al tiempo en las bombas esférica y cilíndrica, para diferentes composiciones de la mezcla. %H<sub>2</sub> = 0, 6.7, 25, 50 y 100%,  $Fr = 1$ ,  $p = 1$  bar,  $T = 300$  K.

Del análisis de esta gráfica, la conclusión más interesante que se obtiene es que, para todas y cada una de las mezclas combustibles, las presiones obtenidas en la bomba de combustión cilíndrica son inferiores a las registradas en la esférica. Ello es debido, fundamentalmente, a la deformación del frente de llama esférico, que se produce al aproximarse éste a las paredes de la cámara de combustión cilíndrica. Además, como consecuencia de la geometría de la bomba, existen espacios entre la llama y las paredes de la cámara de combustión, en los que pueden quedar ciertas cantidades de combustible sin quemar, contribuyendo así a disminuir la fracción de calor liberado, y reducir a su vez las presiones obtenidas.

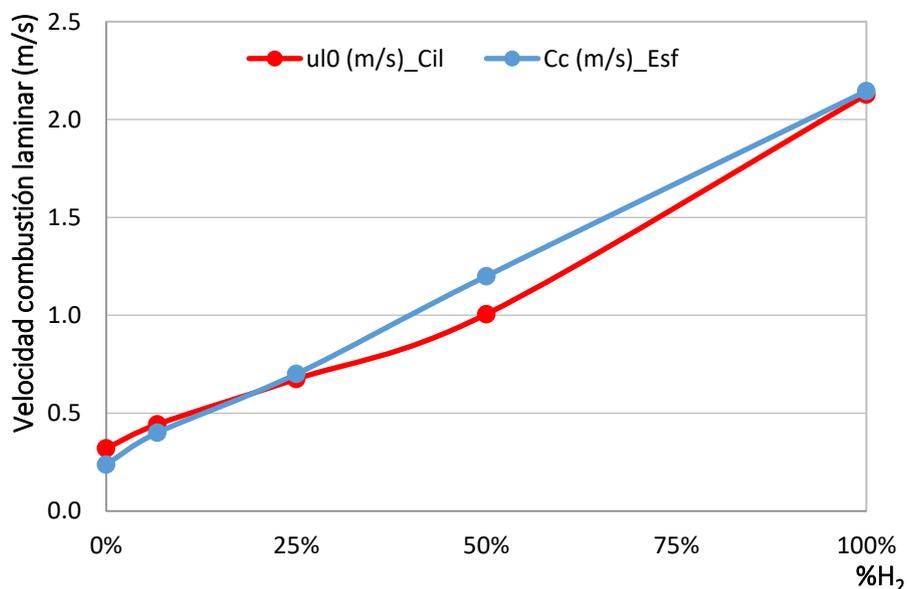
#### 4.4.1.2. Velocidad de combustión

Como se dijo en el apartado de resultados de la bomba esférica, las presiones aquí obtenidas se tomarían como referencia, ya que son muy próximas a las teóricas, predichas por el modelo de diagnóstico de dos zonas. Por lo tanto, al ser las presiones resultantes en la bomba cilíndrica inferiores, la información que se derivada de las mismas, no será correcta, como es el caso de la velocidad de combustión obtenida mediante el tratamiento de las presiones con el modelo de diagnóstico de dos zonas ( $Cc$ ).

En su lugar, para realizar una adecuada comparación entre ambas bombas, se van a representar:

- **Esférica:** Velocidad de combustión laminar, obtenida mediante el tratamiento de las presiones en el modelo de diagnóstico de dos zonas ( $Cc$ )
- **Cilíndrica:** Velocidad de combustión laminar, obtenida mediante el análisis de las imágenes ( $u_l^0$ )

En la Fig 4.29 se muestra la velocidad de combustión laminar de ambas bombas, en función del contenido en hidrógeno de la mezcla H<sub>2</sub>-CO.



**Fig 4.29.** Comparación entre la velocidad de combustión laminar en la bomba esférica ( $Cc$ ) y en la bomba cilíndrica ( $u_l^0$ ), para diferentes composiciones de la mezcla. %H<sub>2</sub> = 0, 6.7, 25, 50 y 100%,  $Fr = 1$ ,  $p = 1$  bar,  $T = 300$  K.

A la vista de los resultados, destaca la palpable similitud entre las velocidades de combustión laminar obtenidas en ambas bombas.

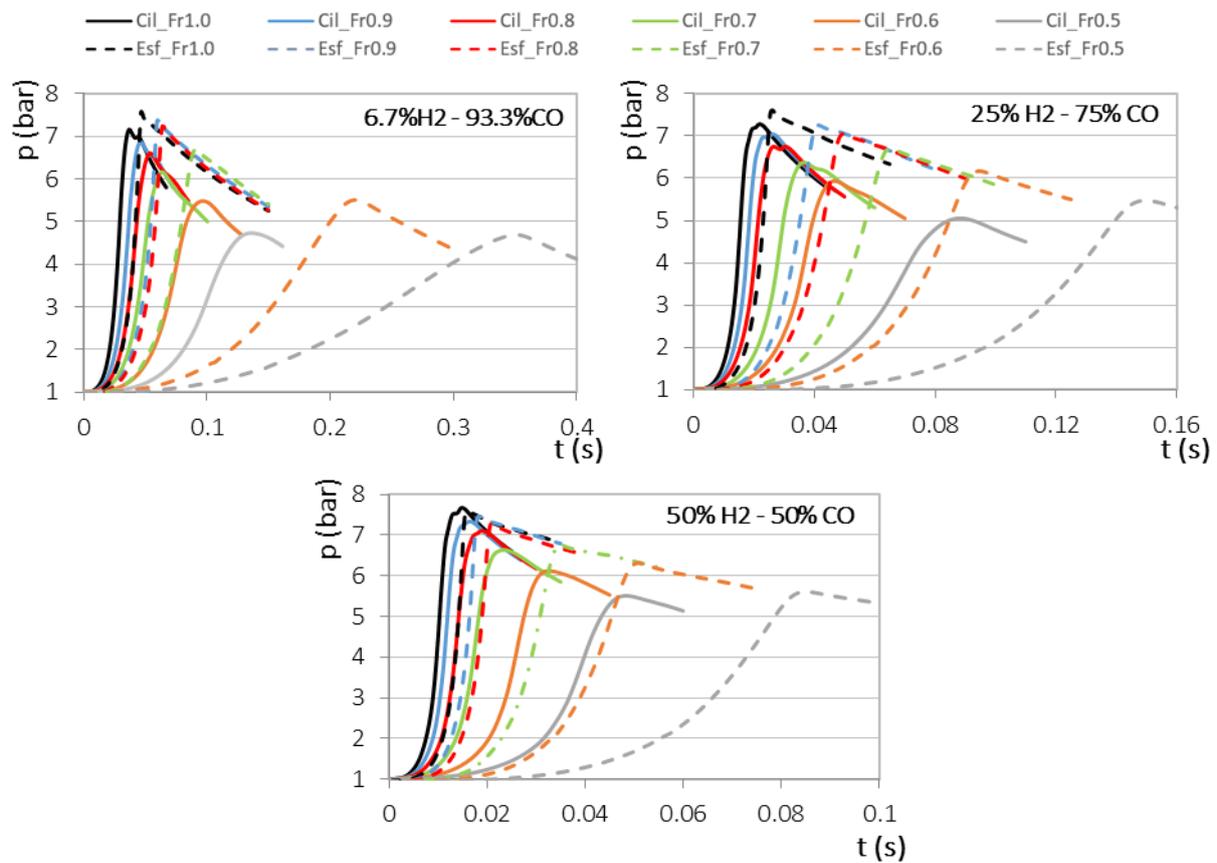
Además, hay que tener presente que, los datos resultantes no sólo han sido adquiridos mediante instalaciones experimentales diferentes, sino que también han sido procesados mediante dos métodos o técnicas completamente independientes.

#### 4.4.2. Influencia del dosado

Manteniendo fijas la presión y la temperatura, y para las tres mezclas combustibles analizadas, se va a variar, una vez más, el dosado relativo de las mismas, desde 0.5 hasta el estequiométrico, comprobando así la influencia del mismo en las presiones y velocidades de combustión de cada bomba.

#### 4.4.2.1. Presión

Resumidas en la Fig 4.30, se encuentran las gráficas de la evolución temporal de la presión obtenidas para las mezclas con contenidos en hidrógeno del 6.7, 25 y 50%, en cada bomba, y para los diferentes dosados estudiados.



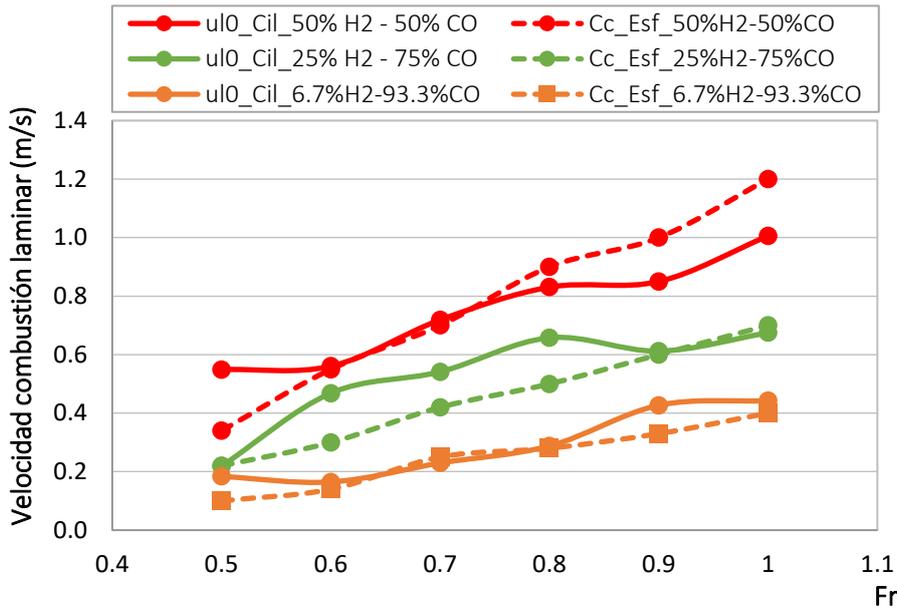
**Fig 4.30.** Comparación entre la evolución de la presión respecto al tiempo en las bombas esférica y cilíndrica, para diferentes dosados. 6.7% H<sub>2</sub> - 93.3% CO, 25% H<sub>2</sub> - 75% CO, 50% H<sub>2</sub> - 50% CO,  $Fr = 0.5 - 1$ ,  $p = 1$  bar,  $T = 300$  K.

A la vista de los resultados, es destacable cómo, para todos y cada uno de los dosados, y para las diferentes mezclas ilustradas, se observa el mismo efecto que en el caso anterior. Las presiones obtenidas en la bomba cilíndrica son inferiores a las registradas en la esférica. La causa es, como ya se ha comentado anteriormente, la deformación del frente de llama esférico en las proximidades de las paredes de la cámara de combustión cilíndrica.

#### 4.4.2.2. Velocidad de combustión

En la Fig 4.31, se recogen las velocidades de combustión laminar, obtenidas mediante el tratamiento de la presión con el modelo de diagnóstico de dos zonas ( $C_c$ ) en la bomba esférica, y mediante el análisis de las imágenes ( $u_l^0$ ) en la cilíndrica, frente al dosado.

Se puede afirmar que las velocidades obtenidas en ambas bombas son bastante similares, con algunas diferencias para ciertos dosados y mezclas.



**Fig 4.31.** Comparación entre la velocidad de combustión laminar en la bomba esférica ( $C_c$ ) y en la bomba cilíndrica ( $u_l^0$ ) para diferentes dosados. 6.7% H<sub>2</sub> - 93.3% CO, 25% H<sub>2</sub> - 75% CO, 50% H<sub>2</sub> - 50% CO,  $Fr = 0.5 - 1$ ,  $p = 1$  bar,  $T = 300$  K.

Es interesante, además, comprobar que para la mezcla de 6.7% de H<sub>2</sub> se dan las menores desviaciones. Ello es debido a que, como ya se comentó en el apartado correspondiente, mayores contenidos de hidrógeno en la mezcla favorecen la inestabilidad de la llama y aumentan la rugosidad de su superficie. Es esta irregularidad del frente de llama, la que dificulta al programa de Matlab la obtención del radio durante el análisis del vídeo de la combustión, y siendo el resto de parámetros derivados de éste, pueden sufrir ciertas desviaciones.

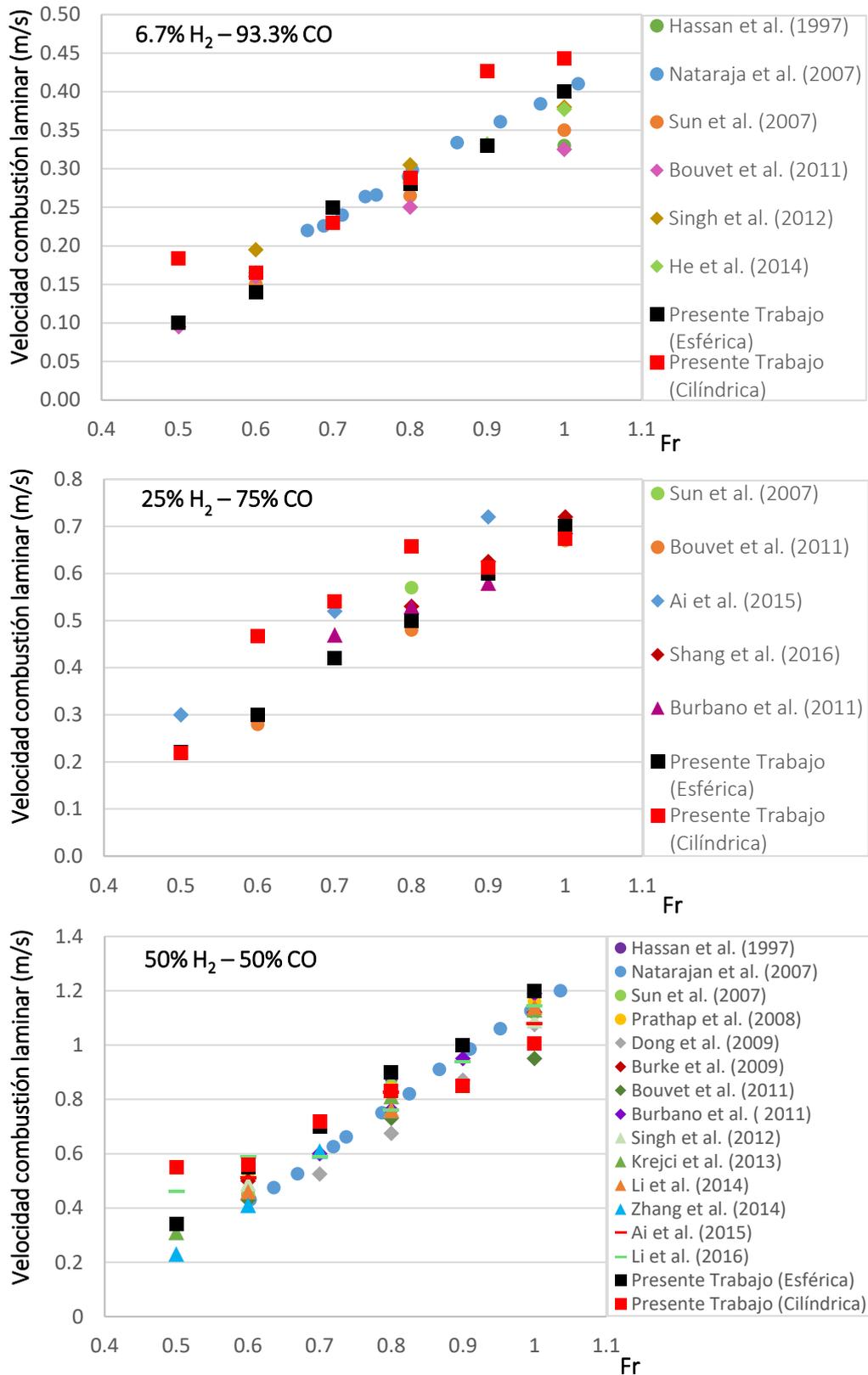
#### 4.4.3. Comparación y validación con la bibliografía

Para finalizar, es conveniente constatar los resultados de la velocidad de combustión laminar, obtenidos en las bombas de combustión esférica y cilíndrica, con los diferentes autores.

Para ello, en la Fig 4.32 se recogen las comparaciones de la velocidad de combustión laminar en función del dosado, con los diferentes autores, para las mezclas 6.7% H<sub>2</sub> - 93.3% CO, 25% H<sub>2</sub> - 75% CO y 50% H<sub>2</sub> - 50% CO.

Para el caso de la mezcla 6.7% H<sub>2</sub> - 93.3% CO, los valores de la velocidad de combustión resultantes en ambas bombas son similares y van en la misma línea que los obtenidos por los autores. Mencionar, de nuevo, que los datos de los autores son para la mezcla 5% H<sub>2</sub> - 95% CO, aunque no supone una desviación de los mismos por ello.

Es cierto que los valores de la bomba esférica, presentan menos desviaciones respecto a las referencias que la bomba cilíndrica, principalmente en los dosados más bajos y más altos. Aun así, los resultados del presente trabajo, para esta mezcla combustible, pueden ser validados.



**Fig 4.32.** Comparación con los datos de la bibliografía de la velocidad de combustión laminar en la bomba esférica ( $C_c$ ) y en la bomba cilíndrica ( $u_l^0$ ), frente al dosado. **6.7% H<sub>2</sub> – 93.3% CO, 25% H<sub>2</sub> – 75% CO, 50% H<sub>2</sub> – 50% CO, Fr = 0.5-1, p = 1 bar, T = 300 K.**

En cuanto a la mezcla 25% $H_2$  – 75% $CO$ , los valores de la velocidad de combustión resultantes en ambas bombas también son similares a los obtenidos por los autores. Nuevamente, la velocidad de combustión laminar de la bomba cilíndrica, difiere más con los autores que la de la esférica. Los datos más desviados, correspondientes a los dosados de 0.6, 0.7 y 0.8, son similares a los de Ai et al. [71], que obtuvieron sus experimentos mediante una bomba cilíndrica de doble cámara. Una vez más, por seguir la misma tendencia y ser del mismo orden que los de la bibliografía, los resultados de ambas bombas se pueden considerar válidos.

Es en el caso de la mezcla 50%  $H_2$  – 50%  $CO$ , en el que los datos obtenidos en el presente trabajo, tanto en la bomba esférica como en la cilíndrica, se asimilan más a los reportados por los autores. Por tanto, estos resultados y la metodología experimental empleada, se dan por válidos.

# 5. CONCLUSIONES

---



## 5.1. Conclusiones

En el presente TFM se ha realizado un estudio del proceso de combustión del gas de síntesis en bombas de combustión a volumen constante, a través de la caracterización de su velocidad de combustión y del estudio morfológico de la llama producida durante la combustión.

Para llevar a cabo este trabajo, se han utilizado herramientas experimentales y modelos teóricos de diagnóstico y de análisis de imágenes. Con todo ello, se han alcanzado los objetivos planteados al comienzo del documento.

### 5.1.1. Conclusiones generales

Las conclusiones generales del presente Trabajo Fin de Máster son las siguientes:

- Para la realización del presente trabajo, ha sido necesaria una profunda revisión bibliográfica del estado del arte acerca de los combustibles gaseosos alternativos, centrada principalmente en el gas de síntesis. Se ha informado de las principales propiedades y aplicaciones del mismo, así como de los parámetros que caracterizan su proceso de combustión, incluyendo, además, una revisión de los trabajos experimentales realizados por diferentes autores. También, y dado que la finalidad de este combustible es su utilización en motores de combustión interna alternativos, y más concretamente en los motores de encendido provocado, se ha revisado el proceso de combustión que se produce en éstos.
- Por otra parte, ha habido un importante aprendizaje acerca de las metodologías experimentales utilizadas, así como de los modelos para el tratamiento de los datos, tanto del modelo de diagnóstico de dos zonas (que permite, a partir del análisis de la presión medida experimentalmente, obtener variables que intervienen en el proceso de combustión), como del análisis de las imágenes obtenidas mediante la grabación de la combustión.
- Se han realizado numerosos experimentos con diferentes composiciones típicas del gas de síntesis, con la finalidad de comprobar la influencia de la fracción de hidrógeno contenida en el combustible y del dosado, en los principales parámetros de la combustión.

### 5.1.2. Conclusiones específicas

Como resultados y conclusiones de la caracterización del proceso de combustión del gas de síntesis en las bombas de combustión esférica y cilíndrica, destacan:

- El gas de síntesis, se ha representado como una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono, ya que son los constituyentes principales de este combustible. Las mezclas con las que se ha experimentado, tienen porcentajes de  $H_2$  del 0, 6.7, 25, 50, 80 y 100%, abarcando así el rango completo de las composiciones más típicas del syngas. Además, el dosado de estas mezclas ha sido variado desde 0.5 hasta el estequiométrico, rango que resulta interesante para la posterior aplicación en un motor de combustión interna, ya que estos valores posibilitan el ahorro de combustible y la instalación de sistemas de post-tratamiento de emisiones contaminantes, respectivamente.
- Para la realización de los experimentos, en condiciones de 1 bar y 300 K, se han utilizado dos bombas de combustión de volumen constante. Una de geometría esférica, en la que los datos obtenidos han sido procesados mediante un modelo de diagnóstico de dos zonas, y una cilíndrica con accesos ópticos, a través de los cuales se puede

visualizar y grabar el proceso de combustión, para posteriormente tratar las imágenes obtenidas y obtener así diferentes parámetros característicos del proceso.

- De los resultados obtenidos en la bomba de combustión esférica, se han extraído varias conclusiones. En lo que a la composición de la mezcla respecta, se ha comprobado que el contenido en hidrógeno favorece un aumento de la presión y de la velocidad de combustión. Estos mismos efectos son producidos en el caso de aumentar el dosado relativo de la mezcla. Además, mediante la obtención de las correlaciones de los coeficientes de la ecuación de Metghalchi y Keck, se ha observado que tanto la velocidad de combustión en las condiciones de referencia como el coeficiente de temperatura, aumentan con el contenido en hidrógeno de la mezcla y con el dosado, mientras que el coeficiente de presión se mantiene prácticamente constante. Por último, los resultados han sido corroborados y validados mediante la comparación de los datos de la velocidad de combustión laminar obtenidos, con los de diferentes autores de la bibliografía.
- En la bomba de combustión cilíndrica, por la geometría de la misma, se produce la deformación del frente de llama esférico, posibilitando, además, que cierta cantidad de combustible se quede sin quemar. Es por ello que las presiones registradas en esta bomba son más bajas que las que deberían producirse según el modelo de diagnóstico, por lo que las velocidades de combustión, obtenidas a partir de las curvas de presión, no reflejan la realidad del proceso. Por lo tanto, la velocidad de combustión pasa a ser determinada mediante el método óptico, donde, a partir de la evolución del radio del frente de llama, se obtiene la velocidad de combustión laminar.
- Los resultados así calculados, son acordes a los obtenidos y validados en la bomba esférica. Es decir, en la bomba cilíndrica también se producen incrementos de la presión y de la velocidad de combustión, al aumentar, tanto la concentración de hidrógeno como el dosado de la mezcla. A su vez, del análisis de la morfología de la llama, se ha llegado a la conclusión de que el contenido en hidrógeno favorece la rugosidad e inestabilidad del frente de llama. El efecto que el dosado tiene en la estabilidad de la llama es el opuesto, ya que son los dosados bajos los que favorecen la celularidad, y con ella, la inestabilidad de la llama.
- Para finalizar, se ha hecho la comparación de los resultados obtenidos en las bombas de combustión esférica y cilíndrica. Así se ha comprobado que, efectivamente, las presiones registradas en la bomba cilíndrica son inferiores a las que se obtienen en la esférica, confirmando la deformación del frente de llama producido en esta bomba.
- Las velocidades de combustión por su parte, obtenidas mediante el procesado de la presión con el modelo de diagnóstico de dos zonas, en la esférica, y mediante el análisis de las imágenes en la cilíndrica, han resultado ser muy similares, para las diferentes composiciones y dosados analizados. Resultados que han sido, a su vez, comparados y validados con los obtenidos por diferentes autores de la bibliografía.

## 5.2. Aportaciones

La realización de este trabajo fin de máster ha permitido conocer, con cierta profundidad, el comportamiento en bombas de combustión de volumen constante de diferentes composiciones de gas de síntesis, que no se habían estudiado hasta el momento en el Grupo de Investigación del laboratorio de Motores y Máquinas Térmicas, de la Universidad de Valladolid.

A su vez, se ha comprobado la influencia de la deformación del frente de llama en el proceso de combustión, mediante la comparación experimental de las bombas esférica y cilíndrica. Además, dado que en este Grupo de Investigación se está realizando una simulación en CFD acerca del efecto de la deformación del frente de llama, este trabajo puede ser de utilidad para la comparación y validación de los resultados que se obtengan.

Por último, tras haber comparado y validado los resultados experimentales con los de la bibliografía relacionada, se ha puesto de manifiesto el correcto funcionamiento de las instalaciones experimentales existentes.

### 5.3. Trabajos futuros

Continuar con la presente línea de investigación, resulta primordial para conocer con más detalle el comportamiento de las mezclas combustibles de gas de síntesis, que como ya se ha comentado, puede resultar un combustible alternativo muy prometedor mediante su uso en motores de combustión interna. Para ello, es necesario seguir experimentando con más mezclas, que presenten diferentes contenidos de hidrógeno, o en las que se realice la introducción de diferentes gases inertes, como el  $N_2$  o el  $CO_2$ , que son componentes presentes en el gas de síntesis. Además, para tener un conocimiento más amplio, se ha de completar el estudio con diferentes condiciones experimentales, en las que se varíen las presiones y temperaturas.

Como se ha introducido en el estado del arte, un método muy extendido para la reducción de los  $NO_x$  en los motores de combustión interna, es la recirculación de los gases de escape o EGR. Por ello sería interesante poder modificar la instalación, de forma que se posibilite tanto la medición de estas emisiones contaminantes, como la recirculación de los productos de la combustión, pudiendo así analizar sus efectos.

En esta línea, de modificaciones de la instalación, también sería conveniente poder realizar la detección de la quimioluminiscencia en la bomba esférica o, para agilizar el proceso de llenado de las bombas de combustión y mejorar su precisión, sería de gran utilidad la realización de un control de llenado electrónico, al que se le indiquen las presiones de llenado y automáticamente las realice.



## 6. REFERENCIAS

---



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [1] «España pretende prohibir las matriculaciones de coches diésel, gasolina e híbridos a partir de 2040», *El Mundo*, 2018.
- [2] «El Gobierno se ‘asusta’ y retira la prohibición de los coches diésel a partir de 2040», *El Confidencial Digital*, 2019.
- [3] Comisión Europea, «Una estrategia europea para la movilidad de bajas emisiones», *Acción climática*, 2019. [En línea]. Disponible en: [https://ec.europa.eu/clima/policias/transport\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policias/transport_en) página web consultada en junio de 2019.
- [4] P. Europeo y C. de la U. Europea, «REGLAMENTO (UE) 2019/631 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO», *D. Of. la Unión Eur.*, pp. 671-854.
- [5] M. Reyes, F. V. Tinaut, A. Horrillo, y A. Lafuente, «Experimental characterization of burning velocities of premixed methane-air and hydrogen-air mixtures in a constant volume combustion bomb at moderate pressure and temperature», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 130, pp. 684-697, 2018.
- [6] A. S. Calvete, «Caracterización de procesos de combustión de mezclas H<sub>2</sub>/aire e H<sub>2</sub>/CO/aire para su uso como combustibles en MCIA», Universidad de Valladolid, 2018.
- [7] E. Á. Pérez, «Estudio de inestabilidades y caracterización de combustión de mezclas de metano-hidrógeno-aire en condiciones celulares», 2019.
- [8] M. Valdés y S. Molina, «Introducción histórica», en *Motores de Combustión Interna Alternativos*, F. Payri y J. M. Desantes, Eds. Ed. Reverté, 2015, pp. 2-22.
- [9] A. Riesco, A. Gallegos, J. Montefort, y S. Martínez, «Procesos Alternativos de Combustión en Motores de Combustión Interna.», *Acta Univ.*, vol. 12, n.º 2, pp. 48-57, 2005.
- [10] F. Payri y J. M. Desantes, *Motores de combustión interna alternativos*. 2015.
- [11] F. V. Tinaut y J. J. López, «Combustión en MEP», en *Motores de Combustión Interna Alternativos*, F. Payri y J. M. Desantes, Eds. 2015, pp. 538-577.
- [12] J. B. Heywood, «Combustion in spark ignition engines», en *Internal combustion engine fundamentals*, 1988, pp. 371-490.
- [13] Á. L. Lafuente, «Metodología para el diagnóstico de la velocidad de combustión laminar de mezclas de gases combustibles a partir de la medida de la presión instantánea en una bomba de combustión a volumen constante», Universidad de Valladolid, 2008.
- [14] O. Askari, A. Moghaddas, A. Alholm, K. Vien, B. Alhazmi, y H. Metghalchi, «Laminar burning speed measurement and flame instability study of H<sub>2</sub>/CO/air mixtures at high temperatures and pressures using a novel multi-shell model», *Combust. Flame*, vol. 168, pp. 20-31, 2016.
- [15] A. Katoch, M. Asad, S. Minaev, y S. Kumar, «Measurement of laminar burning velocities of methanol-air mixtures at elevated temperatures», *Fuel*, vol. 182, pp. 57-63, 2016.
- [16] Z. Huang, C. W. Leung, Q. Zhou, C. S. Cheung, X. Li, y X. Li, «Effects of fuel composition

- and initial pressure on laminar flame speed of H<sub>2</sub>/CO/CH<sub>4</sub> bio-syngas», *Fuel*, vol. 238, n.º October 2018, pp. 149-158, 2018.
- [17] Z. Al-Hamamre y J. Yamin, «The effect of hydrogen addition on premixed laminar acetylene-hydrogen-air and ethanol-hydrogen-air flames», *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 38, n.º 18, pp. 7499-7509, 2013.
- [18] D. Bradley, M. Lawes, L. Kexin, y R. Woolley, «The quenching of premixed turbulent flames of iso-octane, methane and hydrogen at high pressures», *Proc. Combust. Inst.*, vol. 31 I, n.º 1, pp. 1393-1400, 2007.
- [19] X. Li, E. Hu, X. Meng, X. Lu, y Z. Huang, «High-temperature oxidation kinetics of iso-octane/n-butanol blends-air mixture», *Energy*, vol. 133, pp. 443-454, 2017.
- [20] S. Gövert, D. Mira, J. B. W. Kok, M. Vázquez, y G. Houzeaux, «Turbulent combustion modelling of a confined premixed jet flame including heat loss effects using tabulated chemistry», *Appl. Energy*, vol. 156, pp. 804-815, 2015.
- [21] A. A. Burluka, M. Harker, H. Osman, C. G. W. Sheppard, y A. A. Konnov, «Laminar burning velocities of three C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O isomers at atmospheric pressure», *Fuel*, vol. 89, n.º 10, pp. 2864-2872, 2010.
- [22] Q. Li, E. Hu, Y. Cheng, y Z. Huang, «Measurements of laminar flame speeds and flame instability analysis of 2-methyl-1-butanol-air mixtures», *Fuel*, vol. 112, pp. 263-271, 2013.
- [23] M. Metghalchi y J. C. Keck, «Laminar Burning Velocity of Propane-Air Mixtures at High Temperature and Pressure», *Combust. Flame*, pp. 143-154, 1980.
- [24] S. Kadowaki, H. Suzuki, y H. Kobayashi, «The unstable behavior of cellular premixed flames induced by intrinsic instability», *Proc. Combust. Inst.*, vol. 30, n.º 1, pp. 169-176, 2005.
- [25] H. Li, G. Li, Z. Sun, Y. Yu, Y. Zhai, y Z. Zhou, «Experimental investigation on laminar burning velocities and flame intrinsic instabilities of lean and stoichiometric H<sub>2</sub>/CO/air mixtures at reduced, normal and elevated pressures», *Fuel*, vol. 135, pp. 279-291, 2014.
- [26] D. Bradley, R. A. Hicks, M. Lawes, C. G. W. Sheppard, y R. Woolley, «The measurement of laminar burning velocities and Markstein numbers for iso-octane-air and iso-octane-n-heptane-air mixtures at elevated temperatures and pressures in an explosion bomb», *Combust. Flame*, vol. 115, n.º 1-2, pp. 126-144, 1998.
- [27] J. H. Tien y M. Matalon, «On the burning velocity of stretched flames», *Combust. Flame*, vol. 84, n.º 3-4, pp. 238-248, 1991.
- [28] C. J. Sun y C. K. Law, «On the nonlinear response of stretched premixed flames», *Combust. Flame*, vol. 121, n.º 1-2, pp. 236-248, 2000.
- [29] J. J. H. M. Lapuerta, «Combustibles», en *Motores de Combustión Interna Alternativos*, F. Payri y J. M. Desantes, Eds. Ed. Reverté, 2015, pp. 389-413.
- [30] I. Dincer y C. Zamfirescu, «Chapter 3 - Fossil Fuels and Alternatives», en *Advanced Power Generation Systems*, I. Dincer y C. Zamfirescu, Eds. Boston: Elsevier, 2014, pp. 95-141.
- [31] H. M. Li, G. X. Li, Y. H. Jiang, L. Li, y F. S. Li, «Flame stability and propagation characteristics for combustion in air for an equimolar mixture of hydrogen and carbon monoxide in

- turbulent conditions», *Energy*, vol. 157, pp. 76-86, 2018.
- [32] C. Bae y J. Kim, «Alternative fuels for internal combustion engines», *Proc. Combust. Inst.*, vol. 36, n.º 3, pp. 3389-3413, 2017.
- [33] K. Ravi, S. Mathew, J. P. Bhasker, y E. Porpatham, «Gaseous alternative fuels for Spark Ignition Engines-A technical review», *J. Chem. Pharm. Sci.*, vol. 10, n.º 1, pp. 93-99, 2017.
- [34] F. V. Tinaut y A. Horrillo, «Requerimientos y formación de la mezcla en MEP», en *Motores de Combustión Interna Alternativos*, Ed. Reverté, 2015, pp. 446-497.
- [35] M. Muñoz, F. Moreno, J. Morea-Roy, J. Ruiz, y J. Arauzo, «Low heating value gas on spark ignition engines», vol. 18, pp. 431-439, 2000.
- [36] N. Saravanan y G. Nagarajan, «An experimental investigation of hydrogen-enriched air induction in a diesel engine system», *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 33, n.º 6, pp. 1769-1775, 2008.
- [37] G. A. Karim, «Hydrogen as a spark ignition engine fuel», *Chem. Ind. Chem. Eng. Q.*, vol. 8, n.º 2, pp. 256-263, 2002.
- [38] S. Verhelst y R. Sierens, «Hydrogen engine-specific properties», *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 26, n.º 9, pp. 987-990, 2001.
- [39] C. Ji y S. Wang, «Effect of hydrogen addition on lean burn performance of a spark-ignited gasoline engine at 800 rpm and low loads», *Fuel*, vol. 90, n.º 3, pp. 1301-1304, 2011.
- [40] F. V. Tinaut, A. Melgar, B. Giménez, y M. Reyes, «Prediction of performance and emissions of an engine fuelled with natural gas/hydrogen blends», *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, n.º 1, pp. 947-956, 2011.
- [41] R. W. Schefer, D. M. Wicksall, y A. K. Agrawal, «Combustion of hydrogen-enriched methane in a lean premixed swirl-stabilized burner», *Proc. Combust. Inst.*, vol. 29, n.º 1, pp. 843-851, 2007.
- [42] L. M. Das, R. Gulati, y P. K. Gupta, «Comparative evaluation of the performance characteristics of a spark ignition engine using hydrogen and compressed natural gas as alternative fuels», *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 25, n.º 8, pp. 783-793, 2000.
- [43] T. Al Seadi *et al.*, *Biogas handbook*. 2008.
- [44] S. Bari, «Effect of carbon dioxide on the performance of biogas/diesel dual-fuel engine», *Spine (Phila Pa 1976)*, vol. 1, n.º June, pp. 1-7, 1996.
- [45] I. D. Bedoya, S. Saxena, F. J. Cadavid, y R. W. Dibble, «Numerical Analysis of Biogas Composition Effects on Combustion Parameters and Emissions in Biogas Fueled HCCI Engines for Power Generation», *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 135, n.º 7, p. 071503, 2013.
- [46] E. Porpatham, A. Ramesh, y B. Nagalingam, «Effect of compression ratio on the performance and combustion of a biogas fuelled spark ignition engine», *Fuel*, vol. 95, pp. 247-256, 2011.
- [47] E. Porpatham, A. Ramesh, y B. Nagalingam, «Investigation on the effect of concentration of methane in biogas when used as a fuel for a spark ignition engine», *Fuel*, vol. 87, n.º 8-9, pp. 1651-1659, 2008.

- [48] A. . Bridgwater, «Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass», *Chem. Eng. J.*, vol. 91, n.º 2-3, pp. 87-102, mar. 2003.
- [49] C. Ji *et al.*, «Improving the performance of a spark-ignited gasoline engine with the addition of syngas produced by onboard ethanol steaming reforming», *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, n.º 9, pp. 7860-7868, 2012.
- [50] F. Y. Hagos, A. R. A. Aziz, y S. A. Sulaiman, «Syngas (H<sub>2</sub>/CO) in a spark-ignition direct-injection engine. Part 1: Combustion, performance and emissions comparison with CNG», *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, n.º 31, pp. 17884-17895, 2014.
- [51] A. Shah, R. Srinivasan, S. D. Filip To, y E. P. Columbus, «Performance and emissions of a spark-ignited engine driven generator on biomass based syngas», *Bioresour. Technol.*, vol. 101, n.º 12, pp. 4656-4661, 2010.
- [52] H. C. Lee, L. Y. Jiang, y A. A. Mohamad, «A review on the laminar flame speed and ignition delay time of Syngas mixtures», *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, n.º 2, pp. 1105-1121, 2014.
- [53] N. Bouvet, C. Chauveau, I. Gökalp, y F. Halter, «Experimental studies of the fundamental flame speeds of syngas (H<sub>2</sub>/CO)/air mixtures», *Proc. Combust. Inst.*, vol. 33, n.º 1, pp. 913-920, 2011.
- [54] C. Dong, Q. Zhou, Q. Zhao, Y. Zhang, T. Xu, y S. Hui, «Experimental study on the laminar flame speed of hydrogen/carbon monoxide/air mixtures», *Fuel*, vol. 88, n.º 10, pp. 1858-1863, 2009.
- [55] J. Fu, C. Tang, W. Jin, L. D. Thi, Z. Huang, y Y. Zhang, «Study on laminar flame speed and flame structure of syngas with varied compositions using OH-PLIF and spectrograph», *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 38, n.º 3, pp. 1636-1643, 2013.
- [56] H. Sun, S. I. Yang, G. Jomaas, y C. K. Law, «High-pressure laminar flame speeds and kinetic modeling of carbon monoxide/hydrogen combustion», *Proc. Combust. Inst.*, vol. 31 I, n.º 1, pp. 439-446, 2007.
- [57] T. G. Sikes *et al.*, «Laminar Flame Speed and Ignition Delay Time Data for the Kinetic Modeling of Hydrogen and Syngas Fuel Blends», *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 135, n.º 2, p. 021503, 2013.
- [58] A. Kéromnès *et al.*, «An experimental and detailed chemical kinetic modeling study of hydrogen and syngas mixture oxidation at elevated pressures», *Combust. Flame*, vol. 160, n.º 6, pp. 995-1011, 2013.
- [59] D. Singh, T. Nishiie, S. Tanvir, y L. Qiao, «An experimental and kinetic study of syngas/air combustion at elevated temperatures and the effect of water addition», *Fuel*, vol. 94, pp. 448-456, 2012.
- [60] J. Natarajan, T. Lieuwen, y J. Seitzman, «Laminar flame speeds of H<sub>2</sub>/CO mixtures: Effect of CO<sub>2</sub> dilution, preheat temperature, and pressure», *Combust. Flame*, vol. 151, n.º 1-2, pp. 104-119, 2007.
- [61] C. Prathap, A. Ray, y M. R. Ravi, «Investigation of nitrogen dilution effects on the laminar burning velocity and flame stability of syngas fuel at atmospheric condition», *Combust. Flame*, vol. 155, n.º 1-2, pp. 145-160, 2008.

- [62] H. J. Burbano, J. Pareja, y A. A. Amell, «Laminar burning velocities and flame stability analysis of H<sub>2</sub>/CO/air mixtures with dilution of N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>», *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, n.º 4, pp. 3232-3242, 2011.
- [63] J. Wang, Z. Huang, H. Kobayashi, y Y. Ogami, «Laminar burning velocities and flame characteristics of CO-H<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> mixtures», *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, n.º 24, pp. 19158-19167, 2012.
- [64] D. Bradley, P. H. Gaskell, y X. J. Gu, «Burning velocities, Markstein lengths, and flame quenching for spherical methane-air flames: A computational study», *Combust. Flame*, vol. 104, n.º 1-2, pp. 176-198, 1996.
- [65] Z. Huang, Y. Zhang, K. Zeng, B. Liu, Q. Wang, y D. Jiang, «Measurements of laminar burning velocities for natural gas-hydrogen-air mixtures», *Combust. Flame*, vol. 146, n.º 1-2, pp. 302-311, 2006.
- [66] R. Chacartegui, D. Sánchez, J. M. Muñoz De Escalona, F. Jiménez-Espadafor, A. Muñoz, y T. Sánchez, «SPHERA project: Assessing the use of syngas fuels in gas turbines and combined cycles from a global perspective», *Fuel Process. Technol.*, vol. 103, pp. 134-145, 2012.
- [67] M. R. González, «Visualización de procesos de combustión con cámara de alta velocidad.», 2018.
- [68] A.-J. H. Güemes, «Utilización de modelos multizona para la predicción de las emisiones contaminantes de escape en motores de encendido provocado», Universidad de Valladolid, 1998.
- [69] M. I. Hassan, K. T. Aung, y G. M. Faeth, «Properties of laminar premixed CO H<sub>2</sub> air flames at various pressures», *J. Propuls. Power*, vol. 13, n.º 2, pp. 239-245, 1997.
- [70] Y. He, Z. Wang, W. Weng, Y. Zhu, J. Zhou, y K. Cen, «Effects of CO content on laminar burning velocity of typical syngas by heat flux method and kinetic modeling», *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, n.º 17, pp. 9534-9544, jun. 2014.
- [71] M. Han, Y. Ai, Z. Chen, y W. Kong, «Laminar flame speeds of H<sub>2</sub>/CO with CO<sub>2</sub> dilution at normal and elevated pressures and temperatures», *Fuel*, vol. 148, pp. 32-38, 2015.
- [72] R. Shang, Y. Zhang, M. Zhu, Z. Zhang, D. Zhang, y G. Li, «Laminar flame speed of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> diluted H<sub>2</sub>/CO/air flames», *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, n.º 33, pp. 15056-15067, 2016.
- [73] H. M. Li, G. X. Li, Z. Y. Sun, Z. H. Zhou, Y. Li, y Y. Yuan, «Effect of dilution on laminar burning characteristics of H<sub>2</sub>/CO/CO<sub>2</sub>/air premixed flames with various hydrogen fractions», *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 74, pp. 160-168, 2016.
- [74] M. P. Burke, Z. Chen, Y. Ju, y F. L. Dryer, «Effect of cylindrical confinement on the determination of laminar flame speeds using outwardly propagating flames», *Combust. Flame*, vol. 156, n.º 4, pp. 771-779, 2009.
- [75] Y. Zhang, W. Shen, M. Fan, H. Zhang, y S. Li, «Laminar flame speed studies of lean premixed H<sub>2</sub>/CO/air flames», *Combust. Flame*, vol. 161, n.º 10, pp. 2492-2495, 2014.

