



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

DESARROLLO DE APLICACIÓN PRÁCTICA PARA  
EL ANÁLISIS DE VELOCIDADES DE COMBUSTIÓN LAMINAR  
DE COMBUSTIBLES CONVENCIONALES Y ALTERNATIVOS  
PARA SU USO EN MCIA

Autor: Dña. Raquel Leal Fernández

Tutor: Dña. Miriam Reyes Serrano

Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica

Valladolid, septiembre de 2020



## Resumen

Las necesidades de transporte evolucionan en un crecimiento sin frenos en nuestra sociedad, a la par que el aspecto medioambiental cada vez es más una alarma que una necesidad. En este Trabajo, se pone en el punto de mira al fenómeno de combustión de los MCIAs, desde la perspectiva de la ingeniería y la investigación, con el interés de estudiar teóricamente la velocidad de combustión laminar como principal parámetro de definición. Para facilitar el cometido de este trabajo y otros siguientes, se ha desarrollado una herramienta dual de recopilación bibliográfica y de búsqueda, en Microsoft Excel VBA, como auxiliar en la exploración de los posibles combustibles alternativos de cara al futuro como el gas natural y el hidrógeno, sustitutivos de la gasolina, con los que alcanzar el equilibrio entre innovación y sostenibilidad.

## *Abstract*

*Transport needs are evolving in an unrestrained growth in our society, while the environmental aspect is more and more an alarm than a necessity. In this work, the phenomenon of combustion of the MCIAs is put in the point of view of the engineering and research, with the interest of studying theoretically the laminar combustion speed as main parameter of definition. To facilitate the task of this work and others, it has been developed a dual tool for literature collection and search, in Microsoft Excel VBA, as an aid in exploring possible alternative fuels for the future such as natural gas and hydrogen, gasoline substitutes, with which to achieve the balance between innovation and sustainability.*

## Palabras clave

Motores de combustión interna, velocidad de combustión laminar, Microsoft Excel, Virtual Basic for Applications, combustibles alternativos.

## *Key words*

*Internal combustion engines, laminar combustion speed, Microsoft Excel, Virtual Basic for Applications, alternative fuels.*

# Agradecimientos

A mi tutora Miriam,  
por toda su ayuda, paciencia, amabilidad y energía  
durante la realización de este Trabajo.

A mis padres,  
por acompañarme y enseñarme  
a subir los escalones de uno en uno.

A mis compañeros y amigos de Máster,  
que me han demostrado que para llegar lejos  
se necesita ir acompañado.



# Índice general

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Índice general</b> .....   | <b>VII</b>  |
| <b>Índice de figuras</b> .....  | <b>XI</b>   |
| <b>Índice de tablas</b> .....   | <b>XV</b>   |
| <b>Nomenclatura</b> .....   | <b>XVII</b> |
| <b>Capítulo 1: Introducción y objetivos</b> .....                         | <b>1</b>    |
| 1.1. Introducción .....   | 1           |
| 1.2. Antecedentes .....   | 4           |
| 1.3. Justificación y objetivos .....                                      | 5           |
| 1.4. Alcance y estructura.....  | 7           |
| <b>Capítulo 2: Revisión bibliográfica</b> .....                           | <b>9</b>    |
| 2.1. Motores de combustión interna alternativos .....                     | 9           |
| 2.2. El proceso de combustión .....                                       | 11          |
| 2.3. Velocidad de combustión laminar .....                                | 16          |
| 2.3.1. Definición y relevancia .....                                      | 16          |
| 2.3.2. Expresiones de cálculo y tasa de <i>stretch</i> .....              | 17          |
| 2.3.3. Inestabilidades y celularidad .....                                | 21          |
| 2.3.4. Metodologías experimentales para su medida.....                    | 24          |
| 2.4. Combustibles .....   | 33          |
| 2.4.1. Combustibles tradicionales: gasolina .....                         | 33          |
| 2.4.2. Combustibles alternativos: gas natural.....                        | 34          |
| 2.4.3. Combustibles alternativos: hidrógeno.....                          | 37          |
| <b>Capítulo 3: Desarrollo de aplicación en Excel y proyecto VBA</b> ..... | <b>39</b>   |
| 3.1. Justificación y alcance de la aplicación .....                       | 39          |
| 3.2. Estructura de la información en Excel.....                           | 40          |
| 3.2.1. Fichas de recopilación bibliográfica.....                          | 41          |
| 3.2.2. Listado.....   | 46          |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.2.3. Auxiliar Interfaz .....   | 47        |
| 3.2.4. Interfaz Usuario. Calculadora velocidades de combustión laminar ..... | 49        |
| 3.3. Estructura de la programación en VBA .....                              | 50        |
| 3.3.1. Contenido y funciones de los módulos .....                            | 51        |
| 3.3.1.1. Módulo 1. Menús Formularios .....                                   | 53        |
| 3.3.1.2. Módulo 2. Configuración Formulario Estudio de Origen .....          | 54        |
| 3.3.1.3. Módulo 3. Configuración Formulario Temperatura y Presión .....      | 54        |
| 3.3.1.4. Módulo 4. Botón Extraer Gráfica .....                               | 55        |
| 3.3.1.5. Módulo 5. Configuración Datos Hoja Auxiliar .....                   | 55        |
| 3.3.1.6. Módulo 6. Botón Nueva Búsqueda .....                                | 56        |
| 3.3.1.7. Módulo 7. Botón Ir a Ficha .....                                    | 56        |
| 3.3.2. Interacciones al realizar una búsqueda .....                          | 56        |
| <b>Capítulo 4: Resultados y comparaciones .....</b>                          | <b>61</b> |
| 4.1. Gasolina convencional .....   | 61        |
| 4.1.1. Estudio paramétrico: temperatura y presión .....                      | 63        |
| 4.1.2. Estudio paramétrico: recirculación de gases de escape .....           | 65        |
| 4.2. PRFs (Primary Reference Fuels): iso-octano, n-heptano y tolueno .....   | 67        |
| 4.2.1. Estudio paramétrico: iso-octano .....                                 | 68        |
| 4.2.2. Estudio paramétrico: n-heptano .....                                  | 70        |
| 4.2.3. Estudio paramétrico: tolueno .....                                    | 72        |
| 4.3. Gas natural: metano .....   | 74        |
| 4.3.1. Estudio paramétrico .....   | 76        |
| 4.4. Hidrógeno .....   | 78        |
| 4.4.1. Estudio paramétrico .....   | 80        |
| 4.5. Estudios comparativos entre combustibles .....                          | 82        |
| 4.5.1. Gasolina y combustibles primarios de referencia PRFs .....            | 82        |
| 4.5.2. Gasolina y metano .....   | 86        |
| 4.5.3. Gasolina y metano con mezcla de hidrógeno .....                       | 87        |
| <b>Capítulo 5: Conclusiones y líneas futuras .....</b>                       | <b>91</b> |
| 5.1. Conclusiones .....  | 91        |

|                                      |            |
|--------------------------------------|------------|
| 5.1.1. Conclusiones generales.....   | 91         |
| 5.1.2. Conclusiones específicas..... | 92         |
| 5.2. Líneas futuras.....             | 93         |
| 5.3. Aportaciones.....               | 94         |
| <b>Referencias .....</b>             | <b>95</b>  |
| <b>Anexos .....</b>                  | <b>101</b> |



# Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1.1.</b> Consumo de energía final (ktep) por sectores en España y en la Unión Europea [1].....  | 1  |
| <b>Figura 1.2.</b> Aumentos anuales en la producción global de petróleo, y mayores crecimientos anuales de diferentes países [2].....   | 2  |
| <b>Figura 2.1.</b> Fases de la combustión en un MCIA. Adaptada de [14]. .....   | 12 |
| <b>Figura 2.2.</b> Avance del frente de llama en un MEP [4]. .....  | 14 |
| <b>Figura 2.3.</b> Definición y ubicación de las tres fases de la combustión en un MEP [4].<br>.....  | 15 |
| <b>Figura 2.4.</b> a) Imagen Schlieren del frente de llama en el interior de la cámara de combustión de un MEP. Adadptada de [10]. b) Esquema del modelo de análisis de combustión de dos zonas [23]..... | 19 |
| <b>Figura 2.5.</b> Esquema del mecanismo de la inestabilidad térmico-difusiva en la llama [21]. .....   | 23 |
| <b>Figura 2.6.</b> Evolución del régimen laminar al celular en la llama durante la combustión. Adaptada de [11]. .....  | 23 |
| <b>Figura 2.7.</b> Evolución de la celularidad en un frente de llama durante el proceso de combustión [12]. .....   | 24 |
| <b>Figura 2.8.</b> Esquema del método de dos flujos opuestos [21].....  | 26 |
| <b>Figura 2.9.</b> a) Esquema de un quemador de llama plana. b) Esquema del funcionamiento del quemador de llama plana con control del flujo de calor [21].<br>.....                                      | 28 |
| <b>Figura 2.10.</b> Esquema del método del tubo [21]. .....   | 29 |
| <b>Figura 2.11.</b> a) Bomba de combustión cilíndrica, espejos y cámara de velocidad. b) Esquema de instalación de la bomba cilíndrica [18].....  | 31 |
| <b>Figura 2.12.</b> a) Bomba de combustión esférica y sistema de sensores y válvulas. b) Esquema de la instalación [18]. .....  | 32 |
| <b>Figura 2.13.</b> Crecimiento de la demanda mundial de VGN. Adaptada de [45]....  | 35 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 3.1.</b> Ficha de recopilación bibliográfica: ejemplo de entrada de fuente. ....   | 41 |
| <b>Figura 3.2.</b> Ficha de recopilación bibliográfica: ejemplo de entrada de combustible.<br>.....  | 42 |
| <b>Figura 3.3.</b> Ficha de recopilación bibliográfica: ejemplo de entrada de metodología<br>experimental. ....                                  | 43 |
| <b>Figura 3.4.</b> Ficha de recopilación bibliográfica: ejemplo de entrada de expresiones<br>de cálculo. ....                                    | 43 |
| <b>Figura 3.5.</b> Ficha de recopilación bibliográfica: ejemplo de entrada de tablas de<br>datos. ....   | 44 |
| <b>Figura 3.6.</b> Ficha de recopilación bibliográfica: ejemplo de entrada de gráfico. ...   | 45 |
| <b>Figura 3.7.</b> Ficha de recopilación bibliográfica: ejemplo de entrada de gráficas de<br>artículo original. ....                             | 46 |
| <b>Figura 3.8.</b> Listado completo de combustibles y combinaciones de temperatura y<br>presión. ....  | 46 |
| <b>Figura 3.9.</b> Auxiliar interfaz con opción de selección de datos fijos e introducción<br>de datos. ....                                     | 48 |
| <b>Figura 3.10.</b> Interfaz de usuario nombrado como Calculadora de velocidades de<br>combustión laminar. ....                                  | 49 |
| <b>Figura 3.11.</b> Listado de módulos que configuran el proyecto en VBA. ....   | 51 |
| <b>Figura 3.12.</b> Ejemplo de completado de formulario Estudio de Origen en función<br>de la búsqueda Gasolina. ....                            | 53 |
| <b>Figura 3.13.</b> Ejemplo de cambio en el diseño de Selección en función de la<br>posibilidad del usuario de introducir datos de entrada. .... | 54 |
| <b>Figura 3.14.</b> Comprobación de la utilidad de la macro Auxiliar Opción, para<br>escoger los valores correctos a graficar. ....              | 55 |
| <b>Figura 3.15.</b> Interacciones de la programación con el Interfaz de búsqueda:<br>selección de combustible. ....                              | 57 |
| <b>Figura 3.16.</b> Interacciones de la programación con el Interfaz de búsqueda:<br>selección de estudio de origen. ....                        | 57 |
| <b>Figura 3.17.</b> Interacciones de la programación con el Interfaz de búsqueda: extraer<br>gráfica. ....                                       | 58 |
| <b>Figura 3.18.</b> Interacciones de la programación con el Interfaz de búsqueda:<br>resultado final. ....                                       | 59 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 4.1.</b> Estudio paramétrico Gasolina Convencional: influencia de la temperatura. ....                    | 63 |
| <b>Figura 4.2.</b> Estudio paramétrico Gasolina Convencional: influencia de la presión                              | 65 |
| <b>Figura 4.3.</b> Estudio paramétrico Gasolina Convencional: influencia de la recirculación de gases.....          | 66 |
| <b>Figura 4.4.</b> Estudio paramétrico Iso-octano: influencia de la temperatura. ....                               | 69 |
| <b>Figura 4.5.</b> Estudio paramétrico Iso-octano: influencia de la presión. ....                                   | 70 |
| <b>Figura 4.6.</b> Estudio paramétrico n-Heptano: influencia de la temperatura. ....                                | 71 |
| <b>Figura 4.7.</b> Estudio paramétrico n-Heptano: influencia de la presión.....                                     | 72 |
| <b>Figura 4.8.</b> Estudio paramétrico Tolueno: influencia de la temperatura. ....                                  | 73 |
| <b>Figura 4.9.</b> Estudio paramétrico Tolueno: influencia de la presión. ....                                      | 74 |
| <b>Figura 4.10.</b> Estudio paramétrico Metano: influencia de la temperatura.....                                   | 77 |
| <b>Figura 4.11.</b> Estudio paramétrico Metano: influencia de la presión.....                                       | 78 |
| <b>Figura 4.12.</b> Estudio paramétrico Hidrógeno: influencia de la temperatura. ....                               | 80 |
| <b>Figura 4.13.</b> Estudio paramétrico Hidrógeno: influencia de la presión. ....                                   | 81 |
| <b>Figura 4.14.</b> Estudio comparativo gasolina y combustibles PRFs. Influencia de la temperatura. ....            | 83 |
| <b>Figura 4.15.</b> Estudio comparativo gasolina y combustibles PRFs. Influencia de la presión.....                 | 85 |
| <b>Figura 4.16.</b> Estudio comparativo gasolina y metano. Influencia de la temperatura. ....                       | 86 |
| <b>Figura 4.17.</b> Estudio comparativo gasolina y metano. Influencia de la presión. ....                           | 87 |
| <b>Figura 4.18.</b> Estudio comparativo gasolina y mezclas de metano e hidrógeno. Influencia de la temperatura..... | 88 |
| <b>Figura 4.19.</b> Estudio comparativo gasolina y mezclas de metano e hidrógeno. Influencia de la presión.....     | 89 |



# Índice de tablas

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 1.1.</b> Evolución de las normativas europeas que regulan la emisión de contaminantes. Adaptada de [5].                      | 3  |
| <b>Tabla 2.1.</b> Aplicación, fase en la que se encuentran y fuentes de las que se obtienen diversos combustibles [4].                | 10 |
| <b>Tabla 2.2.</b> Clasificación de métodos experimentales para determinar la velocidad de combustión laminar. Adaptada de [19].       | 25 |
| <b>Tabla 2.3.</b> Propiedades del hidrógeno frente al metano y la gasolina. <i>Adaptada de [47].</i>                                  | 38 |
| <b>Tabla 3.1.</b> Resumen esquemático de los módulos de programación en VBA con las macros que incluyen.                              | 52 |
| <b>Tabla 4.1.</b> Valores para el cálculo de la velocidad de combustión laminar para la gasolina y principales PRFs. Adaptada de [4]. | 67 |



# Nomenclatura

|                |  |
|----------------|--|
| $A_f$          | Área de superficie del frente de llama                             |
| $c_c$          | Velocidad de combustión laminar (termodinámica)                    |
| $L$            | Longitud de Markstein  |
| $Le$           | Número de Lewis  |
| $\dot{m}_{ub}$ | Flujo másico de la mezcla fresca                                   |
| $\dot{m}_b$    | Flujo másico de la mezcla quemada                                  |
| $P$            | Presión  |
| $P^0$          | Presión en condiciones de referencia 1 atm                         |
| $R_f$          | Radio del frente de llama  |
| $s_l$          | Velocidad de propagación del frente de llama                       |
| $s_n$          | Velocidad de propagación del frente de llama<br><i>unstretched</i> |
| $T$            | Temperatura  |
| $T^0$          | Temperatura en condiciones de referencia 300 K                     |
| $u_l$          | Velocidad de combustión laminar (de registro óptico)               |
| $u_l^0$        | Velocidad de combustión laminar en condiciones de referencia       |
| $u_n$          | Velocidad de combustión laminar <i>unstretched</i>                 |

## *Símbolos griegos*

|                   |  |
|-------------------|--|
| $\alpha$          | Tasa de <i>stretch</i> , coeficiente termodinámico temperatura en ecuación (7) |
| $\beta$           | Coeficiente termodinámico presión en ecuación (7)                              |
| $\phi$            | Dosado, relación de equivalencia combustible/aire                              |
| $\dot{\rho}_{ub}$ | Densidad de la mezcla fresca   |
| $\dot{\rho}_b$    | Densidad de la mezcla quemada  |



# Capítulo 1:

## Introducción y objetivos

### 1.1. Introducción

En la actualidad, el sector transporte continúa siendo uno de los sectores de consumo con mayor peso en nuestra sociedad, y uno de los más críticos a nivel medioambiental, ante la necesidad de encontrar soluciones para reducir las emisiones y la utilización de combustibles fósiles.

Consultando los datos del Observatorio del Transporte y la Logística de España (OTLE), el sector de transporte representa en nuestro país el 40% del consumo de energía final, tal y como se observa en la Figura 1.1. 126 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> fueron emitidas por el sector transporte en 2017, siendo el más impactante el transporte por carretera, con casi 82 millones de toneladas de emisión CO<sub>2</sub> y 1.174.196 Terajulios de consumo energético [1].

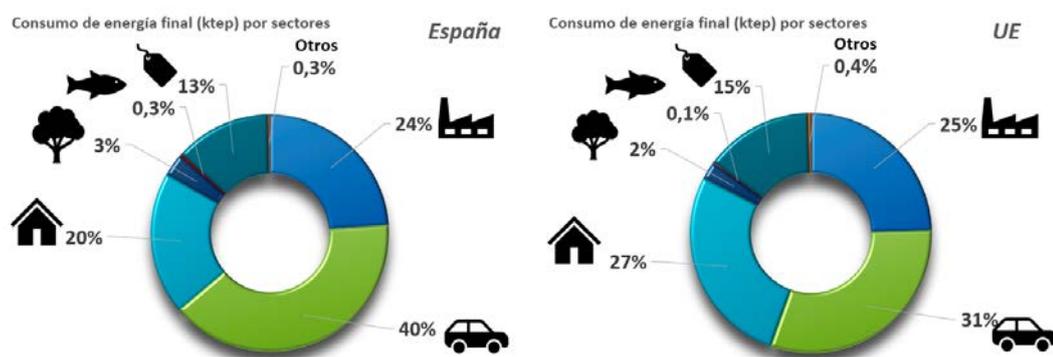
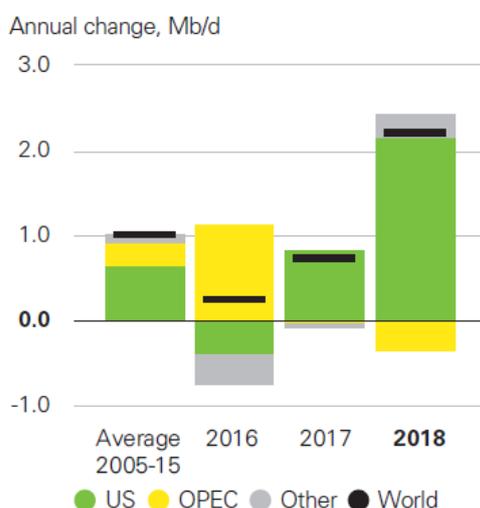


Figura 1.1. Consumo de energía final (ktep) por sectores en España y en la Unión Europea [1].

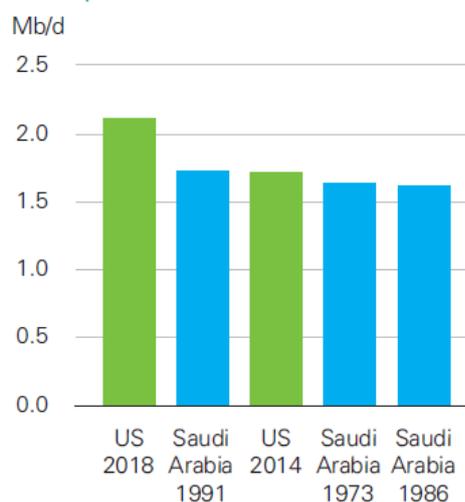
En cuanto a la producción y consumo del petróleo, revisando el documento anual de la compañía BP sobre la energía mundial *BP Statistical Review of World Energy 2019*, la demanda de petróleo supuso un aumento de 1,4 millones de barriles diarios durante el 2018 a nivel global [2]. Estados Unidos marcó récord histórico con el mayor incremento anual de un solo país, con un crecimiento de 2,2 millones de barriles diarios en la producción de petróleo. En la Figura 1.2 se grafican estos datos.

## Oil production

### Global oil production



### Largest annual increases in oil production



**Figura 1.2.** Aumentos anuales en la producción global de petróleo, y mayores crecimientos anuales de diferentes países [2].

Aunque estos datos sean los actuales, la realidad es que se llevan buscando soluciones desde la instauración del Protocolo de Kyoto de 1997, y se continúa reforzando este compromiso cada año. Una de las últimas normativas actuales es el reglamento RDE (*Real Driving Emissions*), que entró en vigor en septiembre de 2019, y que constituye el primer reglamento basado en un ensayo realizado directamente en carretera. El resultado es que permite la medición de emisiones de contaminantes regulados (como los óxidos de nitrógeno  $\text{NO}_x$ , el monóxido de carbono  $\text{CO}$  o los hidrocarburos  $\text{HC}$ ) en condiciones de uso real [3].

Vinculado al peso del sector del transporte y a las normativas orientadas a su evolución, se justifica la investigación de los motores de combustión interna alternativos (en adelante MCIA), ya que los combustibles tradicionalmente utilizados por estos motores son la gasolina y el diésel o gasóleo. Estos combustibles son líquidos y proceden del petróleo, con origen fósil y siendo productos principales de las refinerías, y su utilización en el transporte genera estos contaminantes que se intentan reducir [4].

La evolución de las normativas europeas que han regulado la emisión de estos contaminantes se recogen a continuación en la Tabla 1.1 [5]–[7]. Para los últimos años se mantienen los valores, pero se implantan las normativas en diferentes fases.

| Normativa                  | Fecha entrada en vigor | CO (g/km) | HC + NO <sub>x</sub> (g/km) | PM y hollín (g/km) |
|----------------------------|------------------------|-----------|-----------------------------|--------------------|
| <b>Motores Diesel</b>      |                        |           |                             |                    |
| Euro I                     | Julio 1992             | 2.72      | 0.97                        | 0.140              |
| Euro II, IDI               | Enero 1996             | 1.00      | 0.70                        | 0.080              |
| Euro II, DI                | Enero 1996             | 1.00      | 0.90                        | 0.100              |
| Euro III                   | Enero 2000             | 0.64      | 0.56                        | 0.050              |
| Euro IV                    | Enero 2005             | 0.50      | 0.30                        | 0.025              |
| Euro Va                    | Enero 2009             | 0.50      | 0.23                        | 0.005              |
| Euro Vb                    | Septiembre 2011        | 0.50      | 0.23                        | 0.0045             |
| Euro VIb                   | Septiembre 2014        | 0.50      | 0.17                        | 0.0045             |
| Euro VIId-Temp             | Septiembre 2017        | 0.50      | 0.17                        | 0.0045             |
| Euro VIId                  | Enero 2020             | 0.50      | 0.17                        | 0.0045             |
| <b>Motores de gasolina</b> |                        |           |                             |                    |
| Euro I                     | Julio 1992             | 2.72      | 0.97                        |                    |
| Euro II                    | Enero 1996             | 2.20      | 0.50                        |                    |
| Euro III                   | Enero 2000             | 2.33      | 0.20 + 0.15                 |                    |
| Euro IV                    | Enero 2005             | 1.00      | 0.10 + 0.08                 |                    |
| Euro Va                    | Enero 2009             | 1.00      | 0.10 + 0.06                 | 0.005              |
| Euro Vb                    | Septiembre 2011        | 1.00      | 0.10 + 0.06                 | 0.0045             |
| Euro VIb                   | Septiembre 2014        | 1.00      | 0.01 + 0.06                 | 0.0045             |
| Euro VIId-Temp             | Septiembre 2017        | 1.00      | 0.01 + 0.06                 | 0.0045             |
| Euro VIId                  | Enero 2020             | 1.00      | 0.01 + 0.06                 | 0.0045             |

**Tabla 1.1.** Evolución de las normativas europeas que regulan la emisión de contaminantes. *Adaptada de [5].*

Como reflexión a este desarrollo, se puede concluir que la necesidad que tenemos como sociedad de transportarnos y de utilizar energía en ello continúa creciendo a un ritmo acelerado. Por otro lado, las exigencias sobre el comportamiento de los motores y vehículos cada vez son más restrictivas debido al fuerte impacto medioambiental que producen los procesos de combustión.

En este contexto, está más que justificada y es de gran valor toda la labor investigadora que se realiza con la finalidad de buscar mejoras y nuevos procesos de combustión en los MCIAs, además de combustibles alternativos que abran camino a combustiones limpias y con emisiones prácticamente nulas.

En base a este escenario, se encuentra la motivación para la realización de este Trabajo Fin de Máster. Desde el interés por la automoción y con la idea de que la ingeniería tiene la misión de trabajar creativamente en soluciones a problemas de la sociedad actual, con la responsabilidad y sensibilidad de encontrar también respuestas ante los conflictos medioambientales.

## 1.2. Antecedentes

El presente Trabajo Fin de Máster se realiza en el Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica (IEF) de la Universidad de Valladolid.

El proyecto forma parte de una línea de investigación del Grupo de Investigación Reconocido (GIR) en Motores Térmicos y Energías Renovables, MYER, perteneciente al departamento citado. Este grupo, analiza el uso de combustibles alternativos en motores térmicos, y estudia la caracterización de nuevos procesos de combustión en motores de combustión interna alternativos.

En la última década, se han realizado investigaciones relacionadas con la combustión de biomasa y gas natural. Los investigadores y profesores de la universidad Francisco Tinaut, Andrés Melgar, Blanca Giménez y Miriam Reyes, publican en 2010 un artículo sobre la combustión de biomasa en una bomba de combustión de volumen constante para producir gas [8]; y en 2011 realizan una predicción de la combustión y emisiones de gas natural e hidrógeno en un motor [9].

Se han realizado otros estudios relacionados con combustibles alternativos, por ejemplo en 2012 se publica un artículo sobre las combustiones de mezclas de n-heptano y tolueno [10]. Sin embargo, las más recientes investigaciones se orientan al estudio del gas natural y sobre todo del hidrógeno. En 2017, Miriam Reyes, Francisco Tinaut, Alfonso Hornillo y Álvaro Lafuente, publican su investigación sobre el comportamiento de mezclas de metano-aire<sup>1</sup> y de hidrógeno-aire, a partir de la caracterización de la velocidad de la combustión, propiedad fundamental a lo largo del presente proyecto [11]. De manera reciente, en 2018 se publica un estudio sobre la caracterización óptica de la combustión laminar de mezclas de hidrógeno-aire en condiciones de celularidad [12].

A nivel experimental, en las instalaciones del laboratorio destacan dos bombas de combustión de volumen contante, una con geometría esférica y otra cilíndrica. La continua investigación en este ámbito ha llevado a la construcción de esta última bomba cilíndrica con acceso óptico, que ofrece la ventaja de poder grabar el proceso de combustión mediante una cámara de alta velocidad que emplea la técnica *Schlieren*<sup>2</sup>. Así se pueden obtener pruebas gráficas para estudio, además del valor académico que supone poder visualizar la combustión.

Otras muchas universidades y centros de investigación realizan estudios en este ámbito, por ejemplo, se colabora activamente con la Universidad Politécnica de Valencia. Otros autores serán citados más adelante en el epígrafe Estado del arte.

### 1.3. Justificación y objetivos

La motivación de realizar el presente Trabajo surge del interés de estudio del campo de investigación de los motores térmicos, y de la inquietud por explorar las posibles opciones de combustibles que puedan desarrollarse en el futuro de aplicación en los MCIAs, como respuesta a las necesidades actuales de transporte.

---

<sup>1</sup> El metano es el hidrocarburo del que está compuesto principalmente el gas natural [64].

<sup>2</sup> La técnica de imágenes *Schlieren* se basa en el cambio del índice de refracción de medios con distinta densidad, que produce la creación de áreas claras y oscuras en la imagen. Permite caracterizar la morfología de las llamas de la combustión [65].

La idea del proyecto se justifica con la necesidad de aportar una herramienta con la que explorar el campo de los combustibles y su aplicación en los motores de combustión interna alternativos. Existe un gran campo de estudio con numerosos artículos y publicaciones, por lo que resulta de interés poder agruparlos y acceder a ellos fácilmente para compararlos. A partir de esta idea, se enmarca el objetivo principal del Trabajo.

- Desarrollar una herramienta dual, de utilización tanto de base de datos como de buscador, con una implementación sencilla, intuitiva y fácilmente ampliable, con la finalidad que sirva de apoyo y recopilación a los trabajos de investigación del propio Departamento de la Universidad, como de otros trabajos dentro del campo conjunto.

Esta herramienta, además podría ser de utilidad para posteriores modelos predictivos, desarrollo de motores, y diseños en la combustión a nivel industrial. Los objetivos concretos que se han planteado en torno al desarrollo de esta aplicación, así como su alcance, se desarrollarán posteriormente en el *Capítulo 3: Desarrollo de aplicación en Excel y proyecto VBA*.

A partir de este objetivo principal, surgen otra serie de objetivos secundarios, que se citan a continuación.

- Realizar un estudio teórico sobre los motores de combustión interna alternativos, atendiendo a su clasificación y al proceso de la combustión.
- Realizar un estudio teórico acerca de la velocidad de combustión laminar, como parámetro importante de caracterización de los MCIA y de las propiedades termodinámicas de la combustión, analizando diferentes expresiones de cálculo.
- Revisar las diferentes metodologías experimentales que se utilizan para obtener resultados de estudios, incluyendo las que forman parte de las instalaciones del Departamento, para poder detallarlas en la herramienta.
- Estudiar las posibilidades de combustibles más interesantes para este proyecto, y conocer sus propiedades y aplicaciones.
- Desarrollar nuevos conocimientos a un nivel avanzado del entorno de Microsoft Excel, utilizando la herramienta Virtual Basic (VBA) para implementar la aplicación.
- Utilizar la herramienta desarrollada para la obtención de resultados de los diferentes combustibles, realizando estudios paramétricos para comprobar

la influencia de las variaciones de temperatura y de presión, y el efecto de diferentes mezclas.

## 1.4. Alcance y estructura

Como se ha mencionado, existe un amplio campo de investigación sobre los combustibles y su aplicación en motores de combustión interna alternativos, tomando como parámetro principal de estudio la velocidad de combustión laminar, que se detallará posteriormente.

El alcance de este Trabajo se delimita a estudiar un número determinado de combustibles seleccionados, que serán la gasolina, los combustibles primarios de referencia (PRF) como el iso-octano, el n-heptano y el tolueno; el gas natural adoptado como metano, y el hidrógeno. La justificación de esta selección se detallará a lo largo del presente documento.

Además, para el desarrollo de la recopilación bibliográfica que forma parte de la aplicación en Excel, se considerarán solo algunos de los artículos más representativos para cada combustible, buscando variedad de metodologías experimentales y de rangos de condiciones de temperatura y presión. La finalidad es la de formar una primera base de datos, de carácter abierto y ampliable con diferentes artículos, combustibles, instalaciones o metodologías, en función de las necesidades de la línea de investigación.

Por otro lado, la aplicación a diseñar contará con un entorno de interfaz de usuario, a partir del cual se puedan obtener diferentes resultados en función de unos criterios de búsqueda comunes, de manera automatizada y sencilla. A partir de este entorno, podrán obtenerse distintos resultados a analizar. La automatización de este interfaz contemplará obtener las gráficas de velocidades de combustión laminar de combustibles de manera individual, sin atender a diferentes mezclas entre ellos, ya pueden obtenerse de forma rápida a partir de los datos particulares.

Una vez delimitado el alcance, se detalla la estructura del presente documento. El trabajo se dividirá en seis capítulos, que recogen de manera ordenada los objetivos planteados. En este primer capítulo, se ha realizado una introducción del tema y se ha justificado la motivación del estudio. En el Capítulo 2, se realiza el estudio teórico

completo, recopilando la información necesaria para el aprendizaje sobre los MCIA, la velocidad de combustión laminar, y los métodos experimentales de obtención de datos en el laboratorio.

A lo largo del Capítulo 3, se expondrá el trabajo realizado en Microsoft Excel, para diseñar la herramienta utilizando el entorno de VBA. Se detalla la estructura de la información de recopilación bibliográfica, el diagrama principal de funcionamiento de la programación, y se completa con un pequeño manual de usuario con indicaciones para futuras ampliaciones y desarrollo de la herramienta.

En el Capítulo 4, se analizan las diferentes fuentes de información y se nombran los artículos que completan la bibliografía. A partir de ellos, se obtienen resultados a partir de estudios paramétricos, comparando variaciones de temperatura y presión para cada combustible. Por último, se añaden distintas comparaciones entre mezclas. A partir de este capítulo, se completa el diseño de la herramienta, aportando un punto de vista analítico y una utilidad práctica.

Por último, durante el Capítulo 5 se expondrán las conclusiones principales de este trabajo, y se aportarán las principales líneas de continuación. Finalmente se recogen todas las referencias consultadas, y se anexan las fichas de recopilación bibliográfica extraídas del documento Excel.

## Capítulo 2:

# Revisión bibliográfica

En este Capítulo, se realiza un estudio teórico previo, necesario como documentación acerca de los motores de combustión interna alternativos, y como búsqueda de por qué es representativa la velocidad de combustión laminar como parámetro de estudio, y cuáles son los principales métodos para obtenerla en el laboratorio.

Además, se analizan los combustibles incluidos en el alcance de estudio. Para cada uno, se analiza brevemente su aplicación y justificación de interés, justo con información acerca de sus propiedades, que resultará útil posteriormente para contrastar los resultados obtenidos.

### 2.1. Motores de combustión interna alternativos

Los motores de combustión interna alternativos (MCIA) tienen como antecedentes las máquinas de vapor de la primera revolución industrial en el siglo XVIII, que evolucionan hacia los motores térmicos que conocemos hoy en día gracias al nacimiento de la Termodinámica, de la mano de Carnot. Los primeros MCIA podrían datarse en 1876, con la patente *Gasmotor* presentada por el alemán Nicolaus Otto. Los MCIA actuales tienen más de un siglo de historia, y se mantienen en continua evolución debido a que siguen presentando diferentes problemáticas en cuanto a emisiones y consumo de combustible [4].

Como motor térmico, el principio de funcionamiento del MCIA es el de obtener energía mecánica a partir de la energía térmica contenida en un fluido compresible, transformando la energía química contenida en el fluido mediante el proceso de combustión. Esta combustión se clasifica como interna debido a que el proceso tiene lugar en el propio fluido de trabajo, que generalmente es una mezcla de aire y combustible.

Por último, con el término alternativo se hace referencia a que la combustión se realiza de forma intermitente. El fluido desarrolla un trabajo sobre una superficie móvil, mediante el movimiento rectilíneo del émbolo. La clasificación fundamental de los MCIAs se realiza en base a este proceso de combustión nombrado. Se distinguen los motores de encendido provocado (MEP), convencionalmente conocido como motores de gasolina; y los motores de encendido por compresión (MEC), o motores Diesel.

La diferencia principal entre ellos se basa en que el inicio de la combustión, o encendido, se realiza de forma diferente. En los MEP, el inicio de la combustión se produce gracias a la energía aportada por una fuente de ignición externa, haciendo saltar una chispa entre los dos electrodos de una bujía. En los MEC, el encendido del combustible se realiza por autoencendido de la mezcla en el interior de la cámara de combustión debido a las altas temperaturas en el proceso de compresión [4], [5].

En la Tabla 2.1 se muestra la relación de los tipos de MCIAs con respecto a los tipos de combustibles utilizados.

| Combustible                       | Tipo de motor |     | Fase del combustible |     | Origen del combustible |       |
|-----------------------------------|---------------|-----|----------------------|-----|------------------------|-------|
|                                   | MEP           | MEC | Líquido              | Gas | Fósil                  | Otros |
| Gasolina                          | ■             |     | ■                    |     | ■                      |       |
| Etanol                            | ■             |     | ■                    |     |                        | ■     |
| Metanol                           | ■             |     | ■                    |     | ■                      | ■     |
| MTBE (metil terciario butil éter) | ■             |     | ■                    |     | ■                      | ■     |
| ETBE (etil terciario butil éter)  | ■             |     | ■                    |     |                        | ■     |
| Gas natural                       | ■             |     | ■                    | ■   | ■                      |       |
| Gas licuado del petróleo          | ■             |     | ■                    |     | ■                      |       |
| Hidrógeno                         | ■             |     | ■                    | ■   | ■                      | ■     |
| Diesel                            |               | ■   | ■                    |     | ■                      |       |
| Bio diesel                        |               | ■   | ■                    |     |                        | ■     |
| GTL ( <i>gas to liquid</i> )      |               | ■   | ■                    |     | ■                      |       |
| CTL ( <i>coal to liquid</i> )     |               | ■   | ■                    |     | ■                      |       |
| BTL ( <i>biomass to liquid</i> )  |               | ■   | ■                    |     |                        | ■     |
| DME (bio dimetil éter)            |               | ■   | ■                    |     | ■                      | ■     |
| Biogas (BG)                       | ■             |     | ■                    | ■   |                        | ■     |

**Tabla 2.1.** Aplicación, fase en la que se encuentran y fuentes de las que se obtienen diversos combustibles [4].

Entre los objetivos del presente proyecto, se encuentra la caracterización de la velocidad de combustión laminar para el gas natural y el hidrógeno en su estado gaseoso, por lo tanto, en adelante solo se estudiarán los MEP ya que es el que admite este tipo de combustibles gaseosos a diferencia de los MEC.

Los MCIAs son líderes en el campo de los motores térmicos para aplicaciones de transporte tanto terrestre como marítimo, maquinaria, propulsión, e incluso en plantas de generación de energía y cogeneración, grupos de emergencia, o accionamiento industrial de bombas y compresores.

Su potencialidad se debe a sus claras ventajas en cuanto a rendimiento, con valores máximos de hasta el 55%; su amplio rango de potencia desde decenas de Watios hasta varias decenas de Megavatios, su compatibilidad con combustibles de muy diferente naturaleza y en distintas fases, y sus versátiles características constructivas, ya que el conjunto cilindro-émbolo se puede fabricar en tamaños y configuraciones muy distintas, con diferentes materiales.

Sin embargo, continúan presentando diferentes problemáticas, relacionadas con la emisión de gases contaminantes revisados en el epígrafe de *Introducción*, la limitación en la potencia máxima y la dependencia del petróleo como principal fuente de combustible. Por estos motivos los motores eléctricos o las turbinas de gas son mejores alternativas en muchas aplicaciones, sin embargo, no pueden sustituirlos de forma extensiva.

## 2.2. El proceso de combustión

Una vez contextualizados los MCIAs, el siguiente paso es el de definir el proceso de combustión. Como se explicaba en el epígrafe anterior, el funcionamiento del MCIAs se basa en el trabajo que realiza el fluido mediante el movimiento rectilíneo del émbolo. De forma más detallada, constructivamente el mecanismo que influye en la combustión está basado en la configuración de pistón-biela-manivela, conocido como tren alternativo [13].

En la Figura 2.1 [14], se pueden visualizar las fases de la combustión que tienen lugar debido al movimiento rotativo del cigüeñal, que a su vez empuja al émbolo o pistón en una carrera lineal entre dos puntos del cilindro, nombrados como punto muerto superior (PMS) y punto muerto inferior (PMI). En un motor de cuatro tiempos (4T), estas cuatro fases de admisión, compresión, expansión y escape, se producen en cuatro carreras del émbolo, mientras que en motor de dos tiempos (2T) el ciclo se realiza en dos únicos movimientos [4], [5], [15], [16].

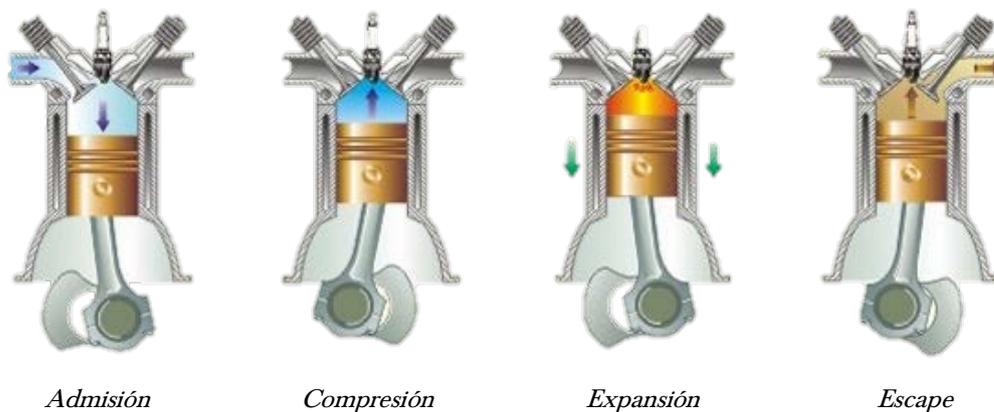


Figura 2.1. Fases de la combustión en un MCIA. Adaptada de [14].

La primera fase es la admisión, durante la cual el émbolo se desplaza desde el PMS hacia el PMI, creando una pequeña depresión en el interior del cilindro que permite la entrada de gases a través del conducto de admisión. Como gases de entrada, en los MEP tradicionales se introduce ya la mezcla de oxidante (normalmente aire) y combustible evaporado (típicamente gasolina).

La razón de mezclar previamente a la combustión reside en que, para el correcto funcionamiento del MEP, la mezcla debe ser lo suficientemente homogénea y con un dosado<sup>1</sup> cercano al estequiométrico. Esto permite tener la suficiente cantidad de oxígeno para la reacción por oxidación de todo el combustible, y que así se produzca una combustión lo más próxima a la completa que sucedería en condiciones ideales.

---

<sup>1</sup> El dosado es la relación combustible/aire de la mezcla inicial en un motor de combustión interna. El dosado estequiométrico es la relación teórica de mezcla de aire y combustible para que en la reacción de combustión no sobre aire ni combustible. Es una propiedad del combustible [66].

Debido al hecho de que se introduzca la mezcla de aire y combustible en la admisión, se conoce la combustión de un MEP como una *combustión premezclada*, que permite que la mezcla sea relativamente homogénea. Sin embargo, no es el único método operativo.

Otra opción se conoce como *inyección directa*, y consiste en introducir únicamente aire durante la carrera de admisión. El combustible se añade en la siguiente fase durante la carrera de compresión, que se detallará a continuación, de manera muy avanzada, para que la mezcla sea homogénea antes del salto de la chispa. De esta forma se produce la estratificación de la carga para obtener beneficios en términos de eficiencia y emisiones.

Continuando con el movimiento del émbolo, tras completar la carrera de admisión, se inicia la carrera inversa desde el PMI hacia el PMS, durante la cual se comprime el fluido en el interior de la cámara de combustión. En una posición próxima al PMS, se produce el aporte exterior de energía para la ignición que caracteriza al MEP y que se nombra en el epígrafe *Motores de combustión interna alternativos*, mediante un salto de chispa a través de la bujía.

Además del concepto de homogeneidad de la mezcla que se ha desarrollado anteriormente, para que la combustión en este punto del ciclo se realice de forma idónea, se trata de evitar que mezcla se autoencienda de forma previa a la chispa, como resultado de la compresión. Es decir, además de que la mezcla sea homogénea, se busca que se encuentre dentro de los límites de inflamabilidad, lo que obliga tener la restricción de realizar el proceso de mezcla pronto y además controlando la temperatura en el interior del cilindro. Esta regulación de carga suele realizarse estrangulando el flujo en el conducto de admisión.

Regresando al punto en el que se ha realizado la carrera de compresión, cerca del PMS salta la chispa para encender de forma externa la mezcla, se inicia el proceso de combustión. A partir de este momento se desarrolla un *frente de llama*, que es la superficie en la que tienen lugar las reacciones químicas entre el combustible y el oxidante anteriormente citadas. Este frente de llama avanza durante la combustión, a medida que se transforman los productos sin quemar en productos quemados. En la Figura 2.2 se muestra una imagen representativa de este frente de llama durante la combustión.

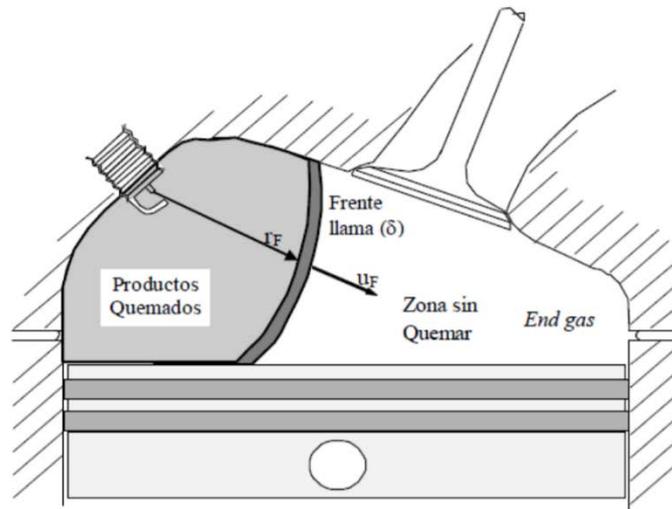


Figura 2.2. Avance del frente de llama en un MEP [4].

La velocidad del avance de esta propagación es del orden de la velocidad media del pistón, y en términos cuantitativos si compara con la velocidad del sonido, se trata de una velocidad muy baja. Por este motivo esta propagación del frente de llama se denomina *deflagración*.

El avance del frente de llama origina tres fases durante la combustión, debido a los cambios en su velocidad. Se definen como precalentamiento, reacción y recombinación. Se ilustran en la Figura 2.3, y se desarrollan a continuación.

Durante la primera fase, la frontera de este volumen de productos quemados se va propagando inicialmente poco a poco, hacia el resto de la mezcla sin quemar que lo envuelve. Tras un tiempo determinado, el tamaño de la región quemada empieza a ser importante, y el efecto de la combustión genera un aumento en la presión en el interior de la cámara.

En este momento comienza la segunda fase, que es mucho más rápida porque hay una mayor superficie del frente de llama y también se ha elevado la temperatura. Durante esta fase se quema la mayor parte de la mezcla, y finaliza cuando el frente de llama se acerca a las paredes de la cámara y se ralentiza. Finalmente, se produce la tercera fase o de recombinación, que no tiene mucho interés a nivel energético [4], [17].

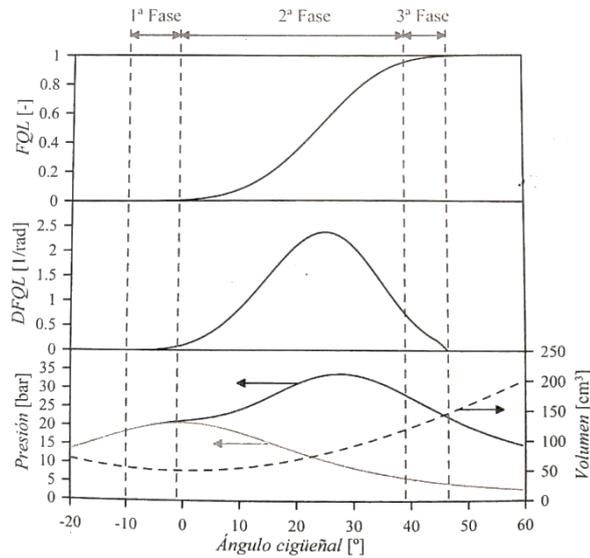


Figura 2.3. Definición y ubicación de las tres fases de la combustión en un MEP [4].

Durante este proceso de combustión, se produce la carrera de retroceso del émbolo o expansión, desplazándose desde el PMS hacia el PMI, debido a la presión de los gases contenidos en el cilindro. Este es el punto del ciclo en el que se obtiene el trabajo útil del motor. Finalmente, se produce la última carrera, de nuevo hacia el PMS para expulsar los gases quemados al exterior del cilindro. Completadas las cuatro etapas del movimiento del pistón, se completa el proceso de combustión.

La combustión descrita reproduce la combustión normal del motor. Sin embargo, durante el proceso pueden producirse anomalías, como la autoinflamación de la mezcla que se ha nombrado anteriormente como fenómeno a evitar, y que produce una combustión detonante llamada *knock* debido a su sonido. Produce efectos negativos como el picado de la superficie del pistón [18].

Una vez conocido el proceso de combustión, uno de los parámetros fundamentales es de la caracterización de esta velocidad de llama, como propiedad fundamental para conocer el comportamiento de la mezcla de oxidante y combustible. Por este motivo es objeto de interés en el presente proyecto.

## 2.3. Velocidad de combustión laminar

### 2.3.1. Definición y relevancia

La velocidad laminar de la llama, o velocidad de combustión laminar, es una de las propiedades más importantes en una mezcla de combustible, y ha sido tema de amplias investigaciones tanto experimentales como teóricas [11].

Su importancia reside en el hecho de que se trata una propiedad intrínseca de la mezcla de combustible [19], [20]. Esto se traduce en que a partir de ella se puede definir tanto la composición como la estructura química de la mezcla, independientemente de la cantidad. Debido a este motivo, resulta un concepto de utilidad práctica en el análisis, diseño y rendimiento de los motores de combustión interna alternativos (MCI) [11].

Se define como la velocidad de propagación de un frente de llama unidimensional, adiabático, plano y estable, dada una mezcla de combustible gaseoso, premezclado y homogéneo [19], [21], [22]. Es decir, es la velocidad a la que se evolucionaría el frente llama descrito en el epígrafe anterior *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.*, para una mezcla determinada, definiendo este frente de llama como el avance de la mezcla quemada frente a la mezcla fresca, y en condiciones termodinámicas ideales.

A partir de este parámetro, se puede determinar la información físico-química de la mezcla en cuanto a su difusividad, reactividad y exotermia. Además, afecta o incluso puede llegar a determinar la tasa de combustión de mezclas de aire y combustible, así como su eficiencia y emisiones [23], [24]. Por otro lado, muchos fenómenos de llamas premezcladas como la extinción, el *flash back* y el *blow off*, pueden ser caracterizados por la velocidad de combustión laminar [19], [25].

La velocidad laminar de combustión se define para unas condiciones específicas de composición, presión y temperatura [11]. Resulta útil para desarrollar y probar modelos de combustión y validar mecanismos cinéticos complejos.

Con todo esto, lo que se deduce es que se trata de una de las propiedades más representativas de la mezcla de combustible que se puede obtener. Para

determinarla, existen teorías y desarrollos matemáticos a partir del análisis termodinámico, también software de modelado por ordenador, y además diferentes métodos experimentales [21].

### 2.3.2. Expresiones de cálculo y tasa de *stretch*

Se pueden obtener expresiones para determinar la velocidad de combustión laminar a partir de metodologías diferentes. Para el caso de las instalaciones del laboratorio del GIR citado en el epígrafe *Antecedentes*, se contemplan dos opciones. La primera a partir del análisis termodinámico de datos de presión instantánea registrados durante el proceso de combustión, y la segunda a partir de la grabación de las imágenes de *Schlieren* [12], [18].

En cuanto a la nomenclatura, la velocidad de combustión laminar a partir del análisis termodinámico se ha nombrado como  $c_c$ , y la que surge a partir del registro óptico como  $u_l$ . La velocidad laminar de combustión  $c_c$  se puede obtener a partir de la ecuación de continuidad, en relación con el flujo másico de la mezcla quemándose  $\dot{m}_b$  (*burned*), la densidad de la mezcla fresca  $\rho_{ub}$  (*unburned*), y el área de superficie del frente de llama  $A_f$  (*flame front*):

$$c_c = \frac{\dot{m}_b}{\rho_{ub} \cdot A_f} \quad (1)$$

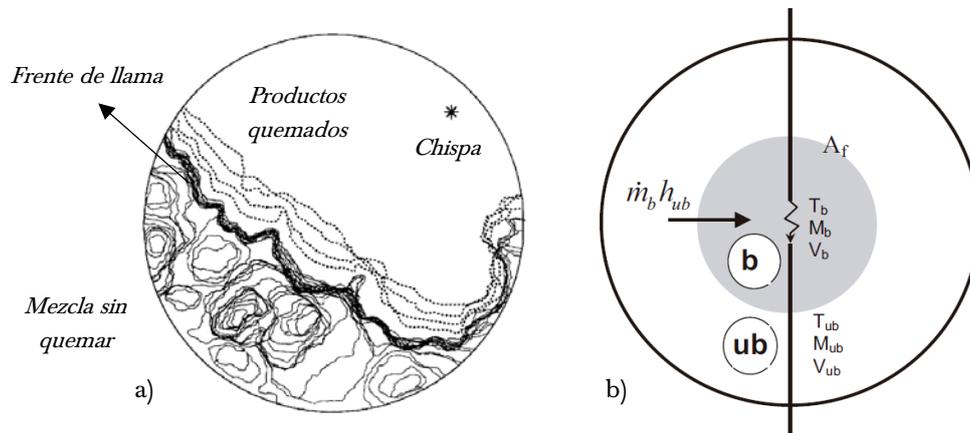
A continuación, se adjunta una tabla de nomenclatura para clarificar y poder seguir de forma más sencilla las expresiones de cálculo desarrolladas en este apartado.

A partir de la ecuación (1), se puede deducir que la elección de la superficie efectiva del frente de llama determina el valor de la velocidad de combustión, ya que el flujo másico es resultante de la reacción que se produce durante la combustión. La superficie de un frente de llama tomado como liso y esférico sería mucho menor que el área del frente real, y el valor de la velocidad de combustión laminar sería aparentemente mayor. En la Figura 2.4 [12], [26], se muestra esta comparación.

|                |  |
|----------------|--|
| $A_f$          | Área de superficie del frente de llama                             |
| $c_c$          | Velocidad de combustión laminar (termodinámica)                    |
| $L$            | Longitud de Markstein  |
| $Le$           | Número de Lewis  |
| $\dot{m}_{ub}$ | Flujo másico de la mezcla fresca                                   |
| $\dot{m}_b$    | Flujo másico de la mezcla quemada                                  |
| $P$            | Presión  |
| $P^0$          | Presión en condiciones de referencia 1 atm                         |
| $R_f$          | Radio del frente de llama  |
| $s_l$          | Velocidad de propagación del frente de llama                       |
| $s_n$          | Velocidad de propagación del frente de llama<br><i>unstretched</i> |
| $T$            | Temperatura  |
| $T^0$          | Temperatura en condiciones de referencia 300 K                     |
| $u_l$          | Velocidad de combustión laminar (de registro óptico)               |
| $u_l^0$        | Velocidad de combustión laminar en condiciones de referencia       |
| $u_n$          | Velocidad de combustión laminar <i>unstretched</i>                 |

*Símbolos griegos*

|                   |  |
|-------------------|--|
| $\alpha$          | Tasa de <i>stretch</i> , coeficiente termodinámico temperatura en ecuación (7) |
| $\beta$           | Coeficiente termodinámico presión en ecuación (7)                              |
| $\phi$            | Dosado, relación de equivalencia combustible/aire                              |
| $\dot{\rho}_{ub}$ | Densidad de la mezcla fresca   |
| $\dot{\rho}_b$    | Densidad de la mezcla quemada  |



**Figura 2.4.** a) Imagen *Schlieren* del frente de llama en el interior de la cámara de combustión de un MEP. Adaptada de [10]. b) Esquema del modelo de análisis de combustión de dos zonas [23].

Por otro lado, continuando con la metodología de registro óptico de la velocidad, en la cámara de combustión el frente de llama se propaga esféricamente con la velocidad de propagación de la llama, nombrada como  $s_l$ . La velocidad de propagación es la derivada del radio del frente de llama  $R_f$  respecto del tiempo, o lo que es lo mismo, equivale a la tasa de crecimiento del frente de llama. Este radio se obtiene a partir de las imágenes *Schlieren*.

$$s_l = \frac{dR_f}{dt} \quad (2)$$

La velocidad de combustión laminar  $u_l$  puede derivarse de la velocidad de propagación  $s_l$ , por el principio de conservación de la masa entre las densidades de los productos quemados ( $b$ ) y sin quemar ( $ub$ ).

$$u_l = \frac{\rho_b}{\rho_{ub}} \cdot s_l = \frac{\rho_b}{\rho_{ub}} \cdot \frac{dR_f}{dt} \quad (3)$$

Esta expresión es la que más se ha utilizado durante la bibliografía, sin embargo, investigaciones posteriores muy actuales describen una relación más compleja entre la velocidad de combustión y de propagación.

Bradley, en el 2019 [27], [28] expresa la relación entre la velocidad de la tasa de combustión de la masa ( $u_{nr}$ ) y las velocidades  $u_n$  y  $s_n$  mediante la expresión:

$$u_{nr} = (s_n - u_n) \cdot \left( \frac{\rho_{ub}}{\rho_b} - 1 \right)^{-1} = u_g \cdot \left( \frac{\rho_{ub}}{\rho_b} - 1 \right)^{-1} \quad (4)$$

Siendo  $u_g$  la máxima velocidad del gas hacia el exterior. Sin embargo, para el presente proyecto se considerarán las expresiones anteriores, debido a la sencillez de no descomponer la velocidad de combustión laminar.

Además, debido a que en la práctica la llama unidimensional no es la que se produce realmente, como se mostraba en la Figura 2.4, a la velocidad de combustión laminar ideal se la nombra como  $u_n$ , y a la velocidad de combustión laminar real simplemente como  $u_l$ . La diferencia entre ellas reside en inestabilidades que se nombrarán más adelante, y además en una deformidad geométrica que produce el estiramiento de la llama, mediante un fenómeno conocido como *stretch*. La nomenclatura  $u_n$  correspondería, por lo tanto, a una llama sin *stretch*, y  $u_l$  a la afectada por el *stretch*.

Para el caso de un frente de llama que se expande esféricamente hacia el exterior, la tasa de expansión del área del frente de llama debido a su curvatura se denomina tasa de estiramiento de la llama o *tasa de stretch* ( $\alpha$ ), y se puede relacionar con la velocidad de propagación:

$$\alpha = \frac{1}{A_f} \cdot \frac{dA_f}{dt} = \frac{2}{R_f} \cdot \frac{dR_f}{dt} = \frac{2}{R_f} \cdot s_l \quad (5)$$

Además, velocidad de combustión laminar con y sin *stretch*, se pueden relacionar entre sí a partir de esta *tasa de stretch*, mediante un parámetro conocido como la longitud de Markstein ( $L$ ), que expresa la sensibilidad de la velocidad de combustión para sufrir el estiramiento debido a la contribución de la aerodinámica en la curvatura de la llama [12], [29]:

$$u_l = u_n + L \cdot \alpha \quad (6)$$

Un valor pequeño para la longitud de Markstein es indicativo de que la influencia de la tasa de estiramiento sobre la velocidad de combustión es baja, y supone un inicio más temprano de inestabilidades. Se puede afirmar, por lo tanto, que un valor alto de la longitud de Markstein refleja una mejora en el proceso. Es un parámetro que depende de factores como la energía de activación, el número de Lewis (que se definirá posteriormente) o el coeficiente de expansión [30].

Por último, cabe indicar que existen diferentes correlaciones para expresar la velocidad de combustión laminar, utilizadas típicamente en la experimentación. La más destacable, es la correlación dada por Metghalchi y Keck [31].

$$u_l = u_l^0 \cdot \left(\frac{T}{T^0}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{P}{P^0}\right)^\beta \quad (7)$$

Siendo  $u_l^0$  la velocidad de combustión laminar en las condiciones de referencia  $T^0$  y  $P^0$ , típicamente 300K y 1bar. Los coeficientes termodinámicos  $\alpha$  y  $\beta$ , dependen del tipo de mezcla y del dosado al igual que la temperatura y la presión, y  $\alpha$  es independiente a la *tasa de stretch* anterior. Habitualmente,  $\alpha$  toma valores positivos entre 1 y 2, y  $\beta$  suele tomar valores negativos entre -0.5 y 0 [32]. Esta correlación (7) es la más recurrente durante la consulta bibliográfica, debido a su sencillez. De hecho, en muchos artículos se encuentra expresada únicamente con la parte de la ecuación relacionada con la temperatura, debido a que muchas veces las pruebas se realizan a presión constante. Por otro lado, en muchas ocasiones se utilizan otras correlaciones de mayor complejidad y parametrización porque profundizan más en la caracterización del proceso real y resultan más fidedignas.

Considerando la influencia de estos parámetros, se puede concluir indicando que la velocidad de combustión aumenta con la temperatura de los reactivos, debido a un efecto de precalentamiento en la llama. Por el contrario, un aumento en la presión se traduce en una disminución de la velocidad de combustión, debido a que no está favorecida la difusividad de la reacción porque existe una mayor densidad. Por último, como se ha indicado en el epígrafe de *El proceso de combustión*, la velocidad de combustión es máxima para el dosado estequiométrico o ligeramente superior, y éste suele corresponder con el dosado de máxima temperatura de llama [21].

### 2.3.3. Inestabilidades y celularidad

Como se ha explicado anteriormente, la velocidad de combustión laminar es una propiedad ideal, asociada a una llama unidimensional, plana, adiabática y estable. Sin embargo, estas condiciones de idealidad no se corresponden con la realidad del interior de la cámara de combustión, ya que en las llamas premezcladas que se propagan a velocidades subsónicas o *deflagraciones*, aparecen inestabilidades

que hacen que el frente de llama presente rugosidades en lugar de ser liso [18], [21], [33].

El origen de estas inestabilidades se encuentra en fenómenos debidos a las fuerzas de volumen, termo-difusivos e hidrodinámicos. El resultado es que se producen arrugamientos, hasta alcanzar una estructura del frente de llama conocida como *celular*, y que es producto de la combinación de todos estos fenómenos.

Las inestabilidades por fuerzas de volumen surgen por la discontinuidad, tanto en densidad como gravitatoria, entre las masas de gases. La masa de gases quemados (de menor densidad) se sitúa por encima o por debajo de la masa de gases sin quemar (que tiene mayor densidad). Se conoce como inestabilidad de tipo Rayleigh-Taylor, según Kull [34].

Las inestabilidades por causas hidrodinámicas se deben a la expansión térmica que sufren los gases al atravesar el frente de llama. Durante la combustión, se originan zonas cóncavas y convexas debido al movimiento de las masas de gases quemados y sin quemar. Como la velocidad del frente se puede considerar como constante e inalterable (ya que la perturbación es mucho mayor al espesor del frente), se produce un desequilibrio. Este mecanismo se conoce también como inestabilidad de Darrieus y Landau.

Las inestabilidades de origen térmico-difusivo surgen debido a la relación entre la difusividad térmica de la mezcla y la difusividad másica del reactivo en defecto de la mezcla. Es decir, se relacionan con la rapidez con la que se transmite el calor y la masa. Esta relación se cuantifica a través del número de Lewis ( $Le$ ), que actúa de indicador ya que para mezclas con  $Le < 1$ , el frente de llama será inestable en base al punto de vista térmico-difusivo. Estas inestabilidades constituyen el origen más favorable para la condición de celularidad, según experimentaciones de Palm-Leis y Strehlow [35].

Para apoyar este concepto, se muestra en la Figura 2.5 los efectos de ambas difusividades. Además, se ilustran las zonas cóncavas y convexas nombradas anteriormente para las inestabilidades de origen hidrodinámico, con la diferencia de que esta vez la perturbación es menor y más similar al espesor del frente, por lo que sí afecta a la estructura de la llama (la velocidad de propagación del frente ya no es constante).

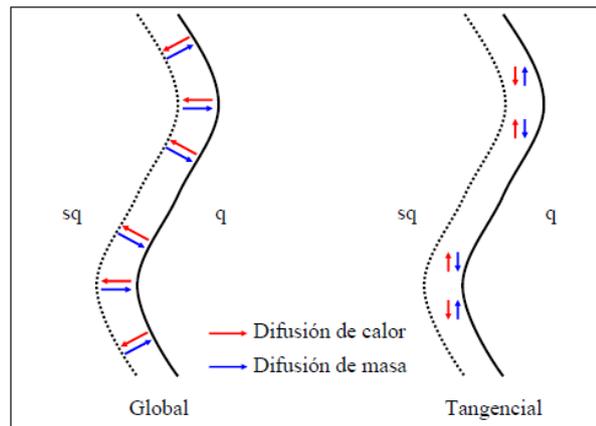


Figura 2.5. Esquema del mecanismo de la inestabilidad térmico-difusiva en la llama [21].

Con toda esta información, la principal conclusión es que, debido al resultado de estas irregularidades, el frente de llama puede ser laminar o celular, o bien evolucionar desde una zona laminar en el inicio de la combustión, hasta una zona celular no ideal, a medida que aumenta la presión y la temperatura en el interior de la cámara. En la Figura 2.6, se muestra un ejemplo ilustrativo de este caso en el que se produce una transición, como resultado experimental para mezclas de metano y aire [11].

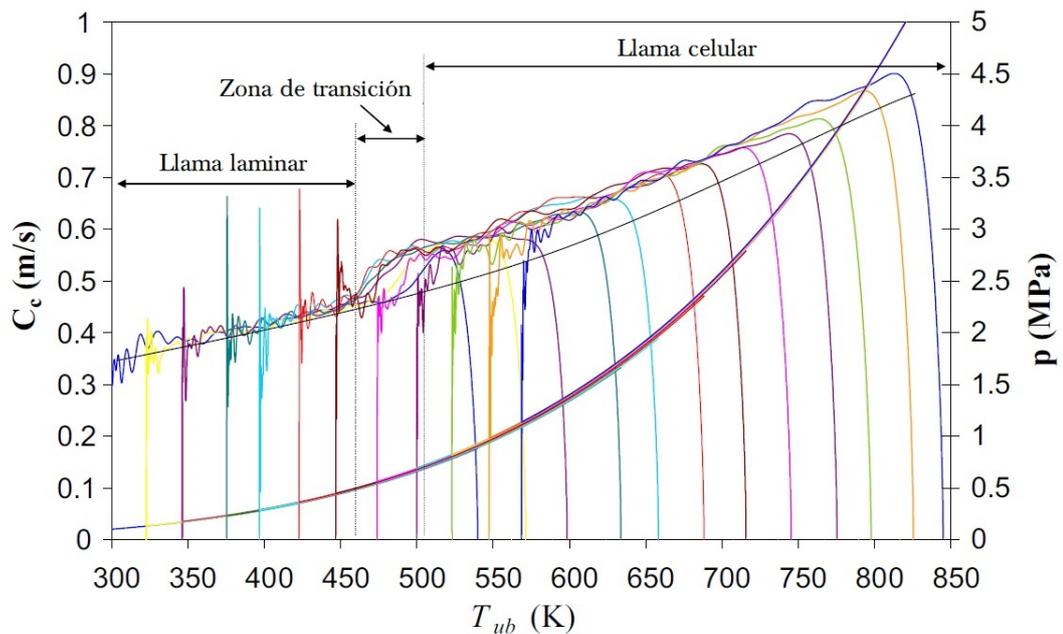
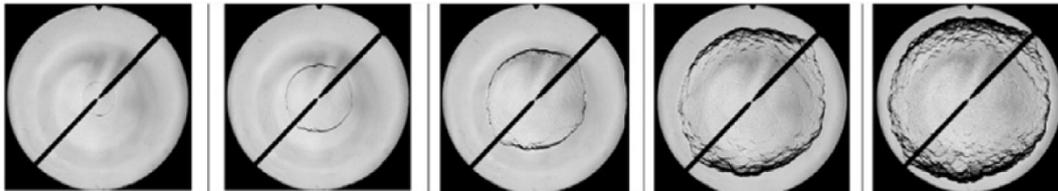


Figura 2.6. Evolución del régimen laminar al celular en la llama durante la combustión. Adaptada de [11].

Por último, en la Figura 2.7 se puede observar la evolución de estas rugosidades desde el frente de llama más liso y próximo al laminar, hasta las condiciones de celularidad, resultado de las experimentaciones realizadas en el laboratorio de la Universidad de Valladolid [12]. **Figura 2.6 Figura 2.6**



**Figura 2.7.** Evolución de la celularidad en un frente de llama durante el proceso de combustión [12].

#### 2.3.4. Metodologías experimentales para su medida

No existe una metodología estandarizada para medir la velocidad de combustión laminar a partir de la experimentación. El resultado es que existe gran diversidad de resultados y dispersión en los valores. Por este motivo, resulta interesante realizar una revisión de los principales procedimientos empleados por los investigadores, ya que será fundamental para poder realizar comparativas más adelante.

En cuanto a las condiciones de experimentación, la problemática que surge se vincula al hecho de que la velocidad de combustión laminar desarrollada solo es válida para un rango de temperaturas y presiones concreto, y depende de la instalación con la que se realiza. Estos rangos de temperatura y presión obtenidos deberán ser lo suficiente elevados para que se asemejen las condiciones de la combustión en un motor MCI, hasta 5 bares y 900 K. Generalmente se consideran 300 K y 1 bar en el laboratorio [11].

Como clasificación fundamental, Kuo [36] distingue dos grandes bloques de metodologías en función de si la llama se mantiene estacionaria o si por el contrario se mueve de forma relativa a un sistema de referencia fijo. Entre los *métodos de llamas estacionarias* se encuentran las llamas de flujo divergente y los quemadores. Los *métodos de llamas no estacionarias* miden llamas que avanzan con cierta velocidad como es el caso del método del tubo y las bombas [11], [21].

En la Tabla 2.3, se recoge esta primera clasificación de las metodologías experimentales de medida de la velocidad de combustión laminar.

Además de esta clasificación más convencional, se pueden distinguir los métodos en función de si son capaces para determinar la velocidad de combustión laminar ideal  $u_l^0$ . Anteriormente, se ha justificado que la llama ideal, unidimensional, plana, adiabática y estable, no se puede conseguir en la práctica. El valor obtenido es el de la velocidad de combustión laminar real  $u_l$ . Sin embargo, algunos métodos si que permiten obtener la velocidad de la llama ideal de manera indiferente, por extrapolación de las condiciones de medida. Estos métodos son el de la llama plana en un flujo divergente, el de la medida de la posición del frente de llama en una bomba a volumen contante, y el del quemador con control del flujo de calor.

|  |                            |                                     |
|--|----------------------------|-------------------------------------|
| <b>Llamas estacionarias</b>              | Llamas de flujo divergente |                                     |
|  | Quemador                   | Determinación geometría llama       |
|  |                            | Velocimetría                        |
|  |                            | Llama plana                         |
| <b>Llamas que se propagan libremente</b> | Tubo                       |                                     |
|  | Bomba                      | Medida radio en periodo pre-presión |
|  |                            | Medida de la presión                |

**Tabla 2.2.** Clasificación de métodos experimentales para determinar la velocidad de combustión laminar. Adaptada de [19].

Por otro lado, se podría realizar otra clasificación en referencia a las condiciones de presión y temperatura citados anteriormente, en función de si el experimento se realiza en condiciones ambiente o en condiciones más extremas. Para el caso de los métodos de llamas estacionarias, lo más frecuente es que se utilicen estas

condiciones ambientales, frente a los métodos de llama libre en los que se utilizan condiciones más similares a las del motor, con especial atención a las bombas.

A continuación, se desarrolla brevemente los puntos más interesantes de la metodología seguida en cada uno de estos métodos.

### *Métodos de llamas de flujo divergente*

En estos métodos se emplea una llama plana y estabilizada para determinar la velocidad de combustión laminar. Existen dos métodos experimentales bajo este criterio: uno sencillo que se fundamenta en proyectar el flujo contra una pared, conocido en inglés como *stagnation flame*; y el segundo que consiste en enfrentar dos flujos y que se nombra como *counterflow*.

En el método de los flujos opuestos o *counterflow* se colocan dos quemadores idénticos enfrentados entre sí, de forma que en cada lado se produzca una llama en condiciones simétricas a la enfrentada, que chocan. A cada lado, la llama se estabiliza en el seno de un flujo con cierta tasa de *stretch*, debido a la divergencia de las líneas de corriente. El objetivo es el de obtener la velocidad de combustión laminar real  $u_l$  para diferentes tasas de estiramiento, y extrapolarlas hasta el punto de cero *stretch* para obtener la velocidad de combustión laminar ideal  $u_l^0$ . El método de flujo proyectado en la pared es similar, pero enfrentando el chorro contra la pared en lugar de con otro chorro. El esquema del método de dos flujos opuestos se ilustra en la Figura 2.13.

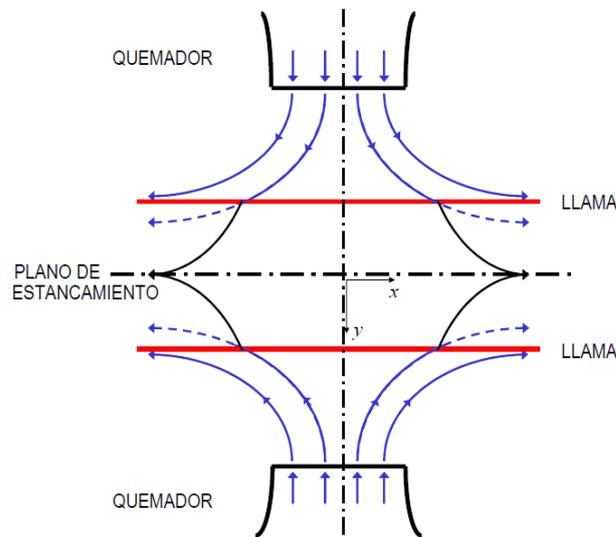


Figura 2.8. Esquema del método de dos flujos opuestos [21].

### *Métodos mediante quemador*

Los primeros quemadores se originan con el método de la llama Bunsen [19], debido a su simplicidad, y se han ido mejorando a lo largo de los siglos. Estas técnicas se aplican a partir de la adición de la mezcla de combustible en el interior de un tubo, de forma que se quema a la salida del mismo, en una llama estacionaria. Existen diferentes tipos de quemadores que original diversas geometrías de llama.

Entre ellos, el quemador puede ser cilíndrico y con forma esbelta, de modo que mediante la proporción se aumenta la velocidad de combustión del gas a medir. De esta forma se puede asegurar que a la salida del quemador se obtenga una mezcla homogénea y un flujo laminar. La velocidad se determina geoméricamente, en base a la medida del área del frente de llama junto con el ángulo del cono.

Un método alternativo a partir de este es el de la medida directa de la velocidad del gas en el quemador. En lugar de obtener un valor medio de velocidad de combustión a lo largo de toda la superficie del frente de llama, con este método se utiliza la velocimetría de partículas, y se determina la velocidad en un punto del frente de llama a partir de la medida local de los gases sin quemar.

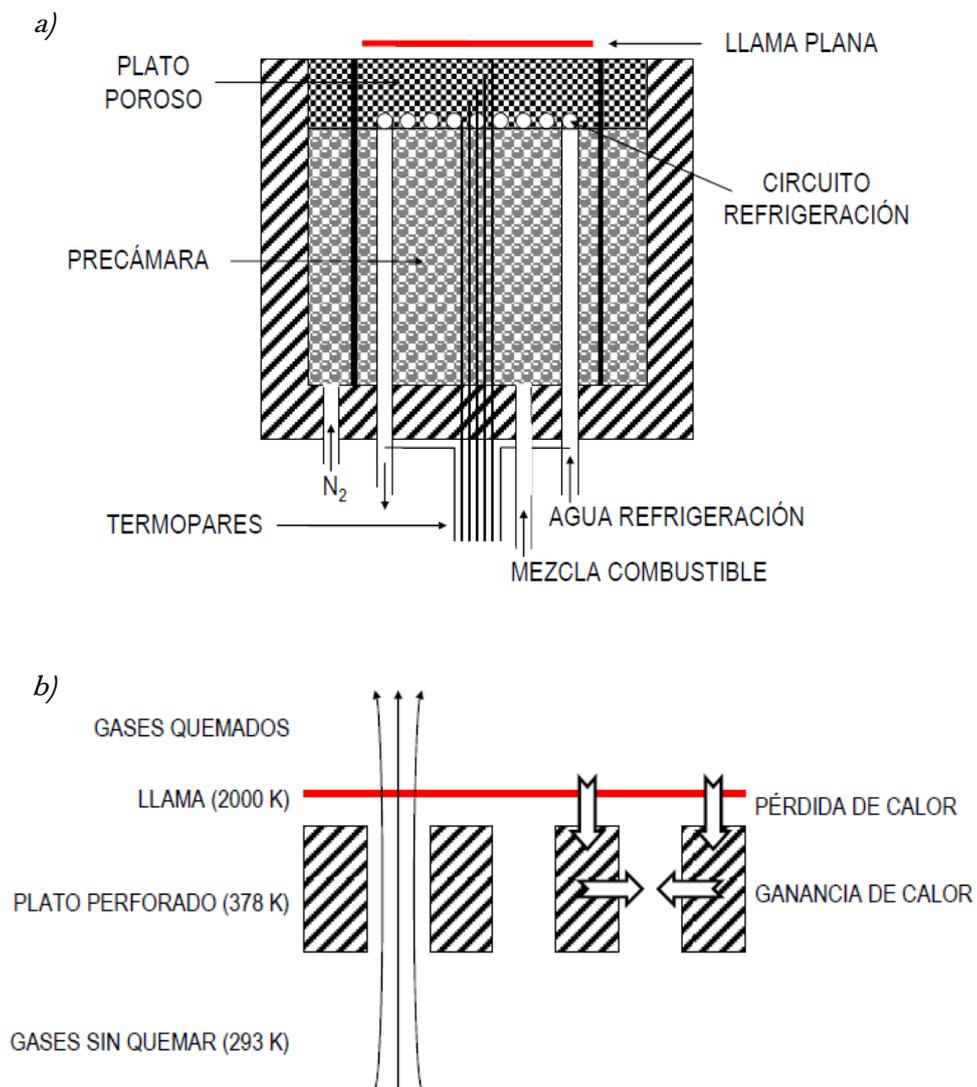
Sin embargo, uno de los más frecuentes en bibliografía es el quemador de llama plana, propuesto por primera vez por Botha y Spalding [37]. Consta de una precámara donde entra la mezcla ya homogénea y se distribuye y uniformiza el flujo hacia el plato poroso. En este plato o disco, se consigue crear un flujo muy homogéneo, que cuenta con un sistema de refrigeración mediante un serpentín con agua. De esta forma el quemador consigue estabilizar, a partir de la pérdida de calor en el plato poroso, para obtener una geometría de llama prácticamente plana.

Una alternativa a este método es el control del flujo de calor o *heat flux burner*, propuesto por van Maaren y de Goey [38], [39]. Tiene la ventaja de evitar el problema de la pérdida de calor en la llama plana estabilizada del quemador. La configuración del quemador es análoga al desarrollado, pero se mejora el circuito de refrigeración a partir de una configuración hexagonal, que permite conseguir un flujo uniforme y una llama plana.

Resulta uno de los métodos más apropiados para medir la velocidad de combustión laminar, debido a que no requiere de extrapolaciones al cero tanto en la tasa de

*stretch* (método de llama plana en flujo divergente), como en la pérdida de calor (método del quemador de llama plana). Por otro lado, cuenta con inconvenientes por incertidumbres en la radiación, el efecto de la condición límite en la superficie del quemador, y las inestabilidades de la llama.

En la Figura 2.9, se muestra el esquema del quemador de llama plana y del funcionamiento para su alternativa con control de flujo de calor.



**Figura 2.9.** a) Esquema de un quemador de llama plana. b) Esquema del funcionamiento del quemador de llama plana con control del flujo de calor [21].

### Método del tubo

Pertenece a la clasificación de métodos que se basan en llamas en movimiento en base a un sistema de referencia. Se trata de uno de los más antiguos, siendo pioneros Mallard y Le Chantelier, en el siglo XIX [40].

Este experimento consta de un tubo, con sección uniforme y un extremo abierto por el cual se introduce el combustible y se prende. Se genera un frente de llama convexo que avanza hacia la mezcla fresca, simulando la combustión tal y como se describe en el epígrafe *El proceso de combustión*. En el extremo cerrado del tubo puede existir una burbuja de jabón colocada en el orificio para medir la velocidad de combustión a partir de su crecimiento. En la Figura 2.10 se muestra un esquema del tubo.

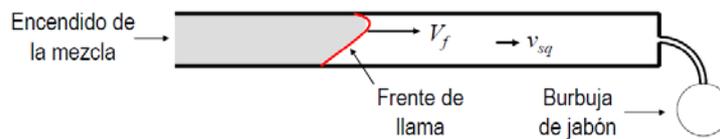


Figura 2.10. Esquema del método del tubo [21].

### Métodos con bomba a volumen constante

La principal ventaja que tienen los métodos utilizando bombas es que resultan muy adecuados para obtener resultados de velocidad de combustión próximos a las condiciones del motor, a altas presiones y temperatura, a diferencia del caso de los quemadores. Son las instalaciones que se encuentran en la mayor parte de la bibliografía, y la presente en el laboratorio de investigación de la Universidad de Valladolid.

Los métodos que utilizan bombas de combustión a volumen constante (BCVC), utilizan la deflagración de la mezcla de combustible confinada en el interior de una cámara rígida, con volumen constante. Se mide la velocidad de combustión laminar a partir de la diferencia entre la velocidad del frente y la de la masa de la mezcla fresca. Esta condición de deflagración es la más similar a la combustión en un MCI, según se desarrollaba en el epígrafe *El proceso de combustión*.

La metodología experimental en una BCVC siempre se fundamenta en este principio de la deflagración, sin embargo, la medida para las velocidades de combustión puede realizarse a partir de diferentes métodos. Los más utilizados se basan en registrar o bien el radio del frente de llama  $R_f$  con el tiempo en el periodo de pre-presión, o directamente registrar la presión con el tiempo. Existen otras técnicas que se basan en medidas de distintos fenómenos simultáneos, como la posición del frente de llama en dos deflagraciones, también con la presión y posición, o la velocidad del frente de llama con respecto a la de la masa fresca.

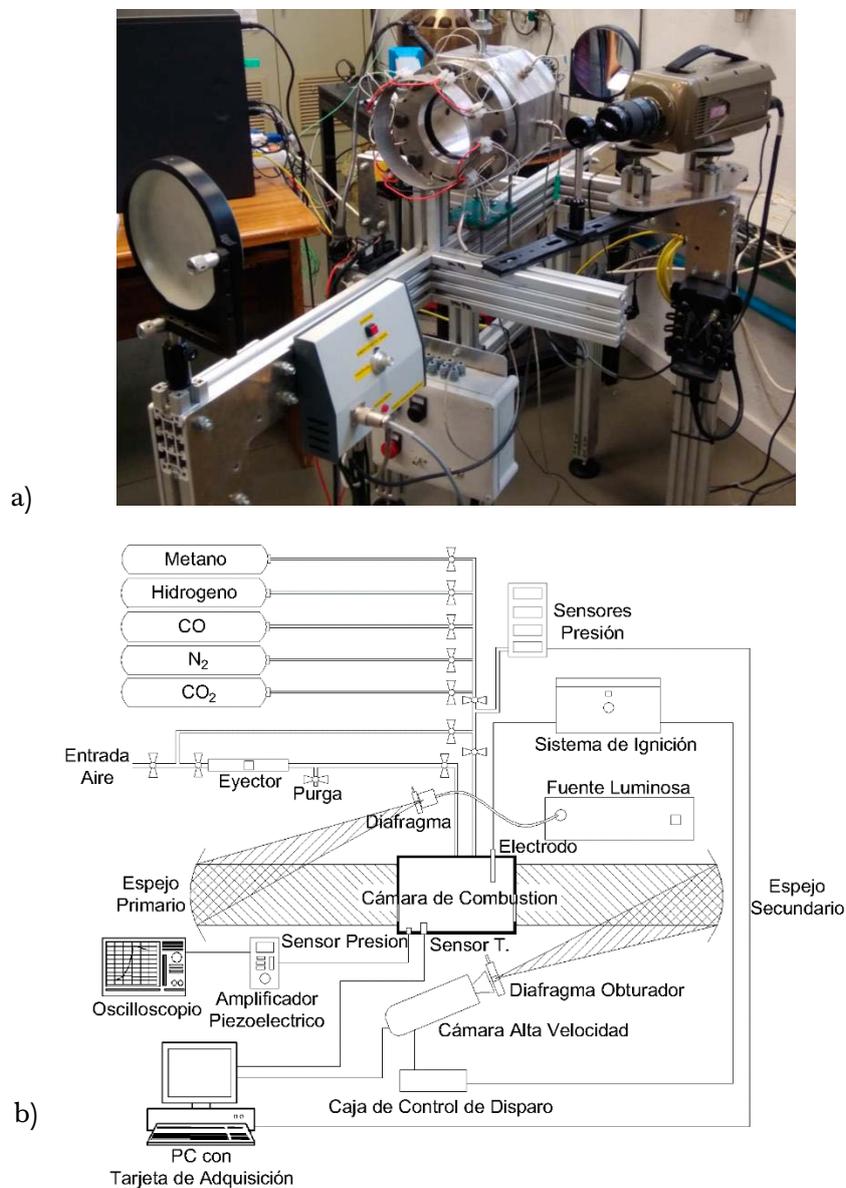
En el método de registro de  $R_f$  con respecto del tiempo, una mezcla de combustible homogénea y en reposo se enciende en el centro geométrico de la cámara de combustión, generando un frente de llama esférico que se propaga hacia afuera. La bomba es el medio para proporcionar las condiciones de presión y temperatura. Se registra el radio del frente de llama en los primeros instantes de la combustión, ya que se pueden considerar a presión constante y por lo tanto también es constante la temperatura de la mezcla fresca. Este es el periodo que se conoce como de *pre-presión*. A partir de esta medida, se puede obtener tanto la velocidad de combustión de la mezcla, su relación con la tasa de *stretch* a través de la longitud de Markstein, y el valor de la velocidad de combustión de la llama ideal unidimensional por extrapolación de la llama esférica a la llama plana.

En el método de registro de la presión  $P$  con respecto del tiempo, la bomba se utiliza para desarrollar la combustión y poder medir la evolución de la presión, para posteriormente relacionarla con la velocidad de combustión. Como esta relación no es directa, se suelen emplear modelos que asumen una serie de hipótesis debido a su complejidad. Estas son, por ejemplo, de uniformidad de la temperatura, espesor del frente de llama despreciable, pérdidas de calor nulas, o geometría de llama esférica y lisa. Para poder medir la evolución de la presión en el interior, se utilizan sensores de ionización, o bien se instala la bomba con acceso óptico.

Registrando la presión en lugar de únicamente el radio, se tiene una ventaja fundamental, y es que se obtienen los resultados de velocidad de combustión para cada uno de los valores de presión y temperatura, en lugar de para un único punto. Además, se obtienen las condiciones más elevadas con respecto a todos los demás métodos. Por contra, el método de registro del radio permite obtener la relación con la tasa de *stretch* y además la hipótesis de la geometría de llama esférica y lisa genera mucha incertidumbre en los resultados.

En cuanto a las instalaciones de la Universidad de Valladolid, en el Área de Máquinas y Motores Térmicos del Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica, se cuenta con dos instalaciones de bomba de combustión a volumen constante, una cilíndrica y la otra esférica, tal y como se describía en el epígrafe de *Antecedentes*. Serán la fuente principal de datos experimentales en este proyecto.

La bomba de combustión cilíndrica (BCVCC) y su esquema de instalación se muestran conjuntamente en la Figura 2.11.



**Figura 2.11.** a) Bomba de combustión cilíndrica, espejos y cámara de velocidad.  
b) Esquema de instalación de la bomba cilíndrica [18].

Esta bomba está diseñada para soportar presión de hasta 20 bar y se puede precalentar hasta 400 K. La presión se mide mediante transductores piezoeléctricos, para tomar datos tanto de la presión de llenado de la bomba, como de la presión instantánea durante el proceso. Además, cuenta con acceso óptico para poder visualizar la combustión, y grabarla con una videocámara CCD de alta velocidad, que presenta una resolución máxima de 1280x800 y una velocidad de captura máxima de 300.000 fsp. De esta forma se podrá aplicar la técnica *Schlieren* de tratamiento de la imagen.

Por otro lado, la bomba de combustión de geometría esférica (BCVCE) que se muestra en la Figura 2.12, está diseñada para soportar presiones de hasta 200 bar (10 veces más que la cilíndrica), y para precalentarla hasta los 600 K. La presión también es medida mediante transductores piezoeléctricos, pero no puede visualizarse o grabarse el proceso puesto que no cuenta con acceso óptico.

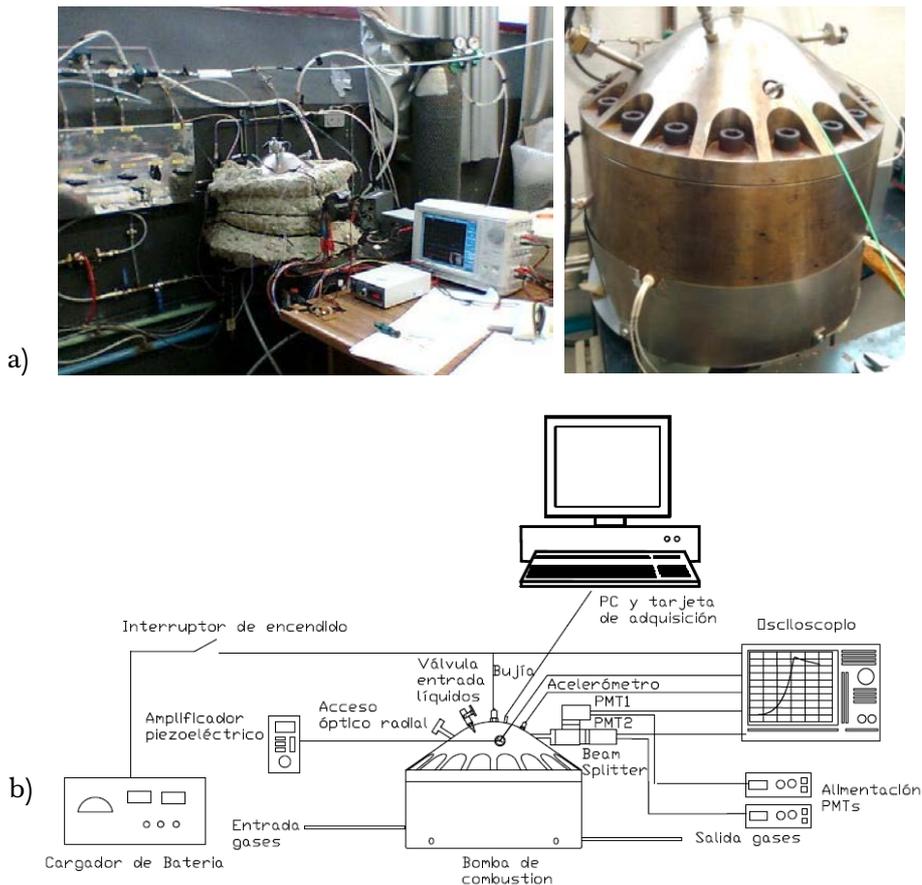


Figura 2.12. a) Bomba de combustión esférica y sistema de sensores y válvulas.  
b) Esquema de la instalación [18].

## 2.4. Combustibles

### 2.4.1. Combustibles tradicionales: gasolina

Tal y como se mencionaba en el epígrafe *Motores de combustión interna alternativos*, el combustible típicamente utilizado para los MEP es la gasolina, mientras que para los MEC se utiliza el Diesel o gasóleo. Para el presente proyecto, el estudio de los motores se centra en los MEP, por lo tanto, las investigaciones realizadas se desarrollan enfocadas a la gasolina como combustible tradicional principal.

La gasolina totalmente mezclada está compuesta por varios cientos de especies de hidrocarburos derivados del petróleo, que contienen entre cuatro y diez átomos de carbono. Además, incluye parafinas tanto de cadena lineal como ramificada, así como aromáticos y olefinas. Abarca puntos de ebullición desde los 25°C hasta los 200°C. La gasolina comercial se obtiene de la destilación fraccionada del petróleo en refinerías, a partir de la nafta, que es una fracción gaseosa fácilmente condensable (GLP). Además, la composición de la gasolina es diferente según la época del año, ya que en invierno presentan aditivos específicos para facilitar el arranque ante las bajas temperaturas [4], [16], [41].

Bajo estas circunstancias, existe una problemática a la hora de realizar experimentación con gasolinas comerciales, debido a la infinidad de composiciones diferentes. Su utilización impide obtener resultados globales que sean comparables con otros estudios, repetir experimentos con el mismo combustible, o incluso limitan modelizar experimentos mediante modelos numéricos. Por este motivo, a nivel de laboratorio se utilizan diferentes derivados y sustitutos de la gasolina.

Estos sustitutos abarcan desde un solo componente hasta la combinación de varios. Los sustitutos de un solo componente pueden ser adecuados para aplicaciones simples como evaluar la eficiencia de la combustión. El iso-octano representa el sustituto más simple de la gasolina como combustible, y es el más recurrente en la bibliografía para poder realizar comprobación de resultados [5], [42].

Existen también mezclas de dos combustibles, conocidas como combustibles de referencia primarios o PRF (*primary reference fuels*), por ejemplo, de iso-octano y

n-heptano, que suponen sustitutos de la gasolina más adecuados para el estudio del índice de octano, a nivel de laboratorio. El índice de octano es un indicador de la resistencia del combustible al autoencendido o efecto que se ha descrito anteriormente como *knock*, que interesa evitar en los MEP. Este ratio es evaluado mediante dos números estándar diferentes: el octanaje medido en laboratorio de investigación o RON (*research octane number*) y el octanaje medido en motor estático MON (*motor octane number*).

Típicamente este índice de octano RON es el que se utiliza para evaluar la calidad de la gasolina, así reconocemos la gasolina 95 o la gasolina 98, que tiene un mayor coste asociado a que resulta mejor combustible de cara al funcionamiento del motor. El iso-octano tiene un índice de octano de 100, mientras que para el n-heptano es de 0. Por este motivo, las mezclas PRF de estos componentes son de gran interés en las experimentaciones, ya que puede aproximarse el comportamiento de la gasolina como combustible eliminando sus limitaciones.

Por último, también cabe citar los sustitutos multicomponentes o TRF (*ternary reference fuels*), que son más adecuados para aplicaciones que dependen de la química del combustible como la emisión y formación de hollín, para tipos especiales de llamas, o para construir modelos químicos robustos de combustibles de gasolinas. Un ejemplo de este tipo de sustitutos es la mezcla de tolueno, n-heptano e iso-octano, propuesto como sustituto de la gasolina de refinerías [42], [43].

A pesar de estos avances tan representativos, la búsqueda de diferentes mezclas para la validación de experimentos es continua y activa, debido a que sigue suponiendo un reto la caracterización de la velocidad de combustión laminar a presiones elevadas, que reflejen la realidad de la cámara de combustión.

#### 2.4.2. Combustibles alternativos: gas natural

Ya se ha comentado la necesidad de desarrollar e investigar acerca de la combustión en MCLA con combustibles alternativos a los usuales, con la finalidad de encontrar soluciones más limpias, eficientes y económicas. El gas natural, el metanol, el etano, el dimetil éter (DME) y el biodiesel se encuentran entre los combustibles alternativos más investigados. De estas opciones, es una de las más crecientes se basa utilización de gas natural. Se incluye dentro de clasificación de

combustibles fósiles, sin embargo es de gran utilidad debido a las amplias reservas disponibles, unido a sus características [44], [45].

El metano ( $\text{CH}_4$ ), es el principal componente del gas natural, constituyendo desde el 80% hasta el 98% de su composición. Por este motivo, existe una amplia bibliografía utilizando mezclas de metano y aire para modelar el comportamiento del gas natural, de forma análoga a lo explicado para la gasolina y el iso-octano. Este es otro de los motivos por el cual se ha seleccionado como combustible fundamental para este proyecto [11], [16], [38].

Tiene origen a partir de los yacimientos de gas. Tras un proceso de eliminación de ácido y secado, se transporta por gaseoducto hasta los centros de consumo o hasta plantas de licuación, donde se produce el conocido como gas natural licuado (GNL). Este gas está considerado como el combustible del 14% de los vehículos pesados de larga distancia en 2035, según investigadores de la Universidad de California. El gas almacena por debajo de los  $-160^\circ\text{C}$  y a presión atmosférica. Para el consumo de vehículos, se aumenta esta presión en estaciones de compresión, hasta obtener el gas natural comprimido [4], [45]. En la Figura 2.13, se demuestra el crecimiento anual de los vehículos de gas natural (VGNs) en todo el mundo hasta el año 2015.

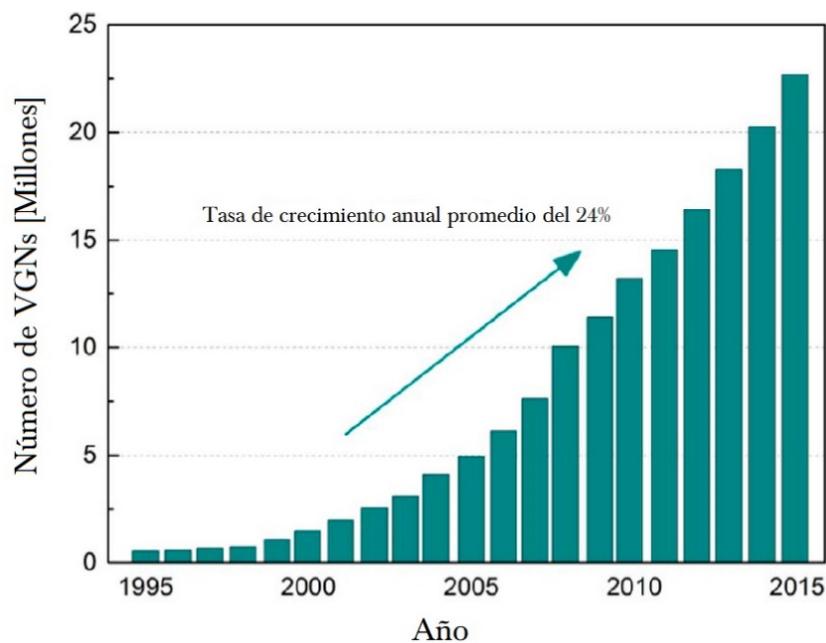


Figura 2.13. Crecimiento de la demanda mundial de VGN. Adaptada de [45].

Sus características están relacionadas con el resto de su composición. Además del metano, está formado por etano (entre el 1% y el 8%), propano (hasta el 2%) y cantidades variables de nitrógeno (hasta el 10%). Esto supone que existe una mayor relación molar entre el hidrógeno y el carbono, por lo que se estima que sus emisiones de CO<sub>2</sub> durante la combustión son inferiores hasta en un 25% con respecto a la gasolina o el Diesel. Por consiguiente, también se reducen las emisiones de hidrocarburos sin quemar y CO. Además, el metano tiene un alto octanaje, que se ha explicado anteriormente como indicativo de eficiencia ante el efecto *knock*.

El hecho de que este combustible tenga fase de gas hace que la formación de la mezcla sea más fácil de controlar, ya que no hay gotas de combustible líquido para vaporizar. Por otro lado, algunas de las características del metano lo hacen más adecuado que otros combustibles gaseosos. La velocidad de combustión de la mezcla estequiométrica de metano-aire en condiciones ambientales es relativamente alta (en torno a 0,36 m/s), lo que significa que los efectos de flotabilidad debidos a los cambios de densidad son menos importantes [11], [16].

A pesar de sus virtudes, el gas natural también presenta una serie de desventajas. El metano en sí mismo es un gas de efecto invernadero con un potencial calentamiento global unas 20 veces superior al CO<sub>2</sub>, por molécula. Su utilización en el transporte a gran escala supondría tener que controlar las emisiones de manera muy cuidadosa. Por otro lado, su almacenamiento en el interior del vehículo como gas también supone un reto, ya que el gas comprimido (a unos 35 MPa), es costoso y supone un importante volumen en el vehículo, teniendo en cuenta que la densidad de energía (en MJ/m<sup>3</sup>) es de un cuarto de la gasolina.

Teniendo en cuenta que el principal parámetro de estudio de este proyecto es la velocidad de combustión laminar, para el caso del gas natural además se presenta el problema de que tiene una velocidad de combustión lenta comparada con la de los combustibles líquidos. Para mejorar la utilización del gas natural y de otros combustibles gaseosos, se contempla en muchos estudios la opción de enriquecerlos con hidrógeno.

### 2.4.3. Combustibles alternativos: hidrógeno

Actualmente, el hidrógeno es la promesa en cuanto a combustibles alternativos, y las investigaciones apuntan a que es el combustible del futuro por ser una fuente de energía limpia renovable y eficiente. Tal y como se exponía anteriormente, su elevada velocidad de combustión laminar lo convierte en un aditivo ideal a los combustibles de hidrocarburos convencionales, entre ellos el gas natural [45].

El hidrógeno es uno de los elementos más abundantes en la naturaleza, sin embargo, no se encuentra de manera aislada. De hecho, su principal inconveniente se basa en el coste y dificultad de su producción. Se puede obtener de diferentes fuentes. La manera ideal de obtenerlo sería mediante la electrólisis del agua, descomponiendo las moléculas en oxígeno e hidrógeno, aunque se necesita mucha energía eléctrica para alimentar lo electrolizadores. Por otro lado, el hidrógeno también puede ser producido a partir de gas natural, carbón y biomasa, mediante un proceso de reformado [16], [46].

En cuanto a las características relacionadas con su combustión, además del aumento de la velocidad de combustión laminar debido a la difusión mucho más rápida del hidrógeno dentro de la llama; destacan la alta inflamabilidad y número de octano. La temperatura de autoignición es mucho menor que para la gasolina, lo que favorece el problema anteriormente citado del autoencendido o *knock*. Además, se caracteriza por ser una energía limpia y renovable ya que, a diferencia de los combustibles hidrocarburos, el único producto nocivo del hidrógeno durante la combustión son los óxidos de nitrógeno  $\text{NO}_x$ . No se dióxido de carbono  $\text{CO}_2$ , monóxido de carbono  $\text{CO}$ , o hidrocarburos sin quemar.

En la Tabla 2.3, se muestran las principales propiedades del hidrógeno de interés para el proceso de combustión, en comparación con el metano y la gasolina [9], [47].

Entre sus actuales desafíos, se encuentra su almacenamiento a bordo de los vehículos. Una gran ventaja del hidrógeno es que puede almacenarse tanto en estado gaseoso como líquido, y puede distribuirse a través de gasoductos. Sin embargo, como gas comprimido a 70 MPa (máxima presión de almacenamiento práctica), presenta alrededor de un tercio de la densidad energética por unidad de volumen del gas natural.

| Combustible  | Hidrógeno      | Metano          | Gasolina                          |
|--|----------------|-----------------|-----------------------------------|
| Fórmula química  | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>n</sub> H <sub>1.87n</sub> |
| Peso molecular   | 2.02           | 16.04           | 114.24                            |
| Menor dosado equivalente para ignición en aire en C.N. <sup>2</sup>                        | 0.1            | 0.53            | 0.70                              |
| Límites de inflamabilidad en aire en C.N. (%vol.)  | 4 - 75         | 5 - 15          | 1.4 - 7.6                         |
| Mínima energía para ignición en aire (MJ)  | 0.02           | 0.29            | 0.28                              |
| Densidad en C.S. <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )   | 0.0837         | 0.6511          | 750                               |
| Difusividad en aire (cm <sup>2</sup> /s)   | 0.63           | 0.2             | 0.07                              |
| Número de octano   | 140            | 120             | 87                                |
| Velocidad de combustión laminar (m/s)  | 2.9            | 0.38            | 0.45                              |
| Velocidad de propagación laminar en aire en C.N. (cm/s)                                    | 265 - 325      | 37 - 45         | 37 - 43                           |
| Distancia de apagado de la llama a la pared en aire en C.N. <i>Quenching distance</i> (cm) | 0.63           | 0.21            | 0.2                               |

**Tabla 2.3.** Propiedades del hidrógeno frente al metano y la gasolina. *Adaptada de [47].*

Por otro lado, esta densidad energética para el hidrógeno líquido supone un cuarto por unidad de volumen de otros combustibles de hidrocarburos. En mezclas de hidrógeno-aire, ocupa alrededor del 30% del volumen de la mezcla frente al 2% de las mezclas de gasolina y aire, y supone la reducción en la potencia del cilindro.

A partir de este punto, surge la cuestión de por qué no se utiliza el hidrógeno puro como combustible en lugar de como aditivo a otros hidrocarburos como el gas natural. La respuesta se encuentra en los desafíos de producción a gran escala, almacenamiento, infraestructuras de almacenamiento de combustible, e incorporación en el vehículo tanto a bordo como durante la combustión del motor. En la etapa actual, el enfoque del hidrógeno como aditivo parece más razonable para promover el hidrógeno como combustible para el transporte, aunque se continúa con la investigación ante esta prometedora alternativa.

<sup>2</sup> C.N. se refiere a condiciones normales de presión y temperatura del aire: P = 1atm y T = 293.15K.

<sup>3</sup> C.S. se refiere a condiciones standard de presión y temperatura del aire: P = 1atm y T = 0°C.

## Capítulo 3:

# Desarrollo de aplicación en Excel y proyecto VBA

Además del trabajo de investigación y recopilación bibliográfica que se ha desarrollado con anterioridad, con la finalidad de abordar el tema del presente Proyecto en profundidad, en este Capítulo se recoge otro de los objetivos fundamentales, que consiste en la creación de una herramienta práctica para utilizar esta información de forma accesible en el campo de la investigación.

### 3.1. Justificación y alcance de la aplicación

El planteamiento de la creación de esta aplicación surge a partir de trabajos anteriores dentro del laboratorio del Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica de la Universidad de Valladolid, donde se observa la necesidad de contar con una herramienta para revisar de forma rápida y accesible los resultados de otras investigaciones, para realizar comparaciones y validaciones en este campo.

Los antecedentes de esta idea se encuentran en el trabajo de tesis de Luis Manuel Mayo, que elabora un libro de Excel con una extensísima revisión bibliográfica sobre las velocidades de combustión laminar para realizar experimentaciones a partir de la información de los artículos de forma ajena al laboratorio [48].

El desarrollo de la herramienta se concibe a partir de esta idea, desde el enfoque de trabajar en la clasificación y organización de la información, para hacerla del todo accesible. Se plantean para ello los siguientes objetivos:

- Elaboración de una revisión bibliográfica clasificada, como base de datos de partida, para diferentes combustibles y donde aparezca detallada la información de referencia del artículo y la metodología experimental.

- Planteamiento de un formato único para recopilar la información de forma organizada y homogénea y fácilmente ampliable e imprimible.
- Creación de un interfaz con el que poder interactuar con los datos de la bibliografía de manera sencilla, por cualquier tipo de usuario, tanto a nivel comercial e industrial como de perfil investigador.
- Desarrollo en un entorno común a cualquier usuario, compatible con diferentes equipos y fácilmente modificable sin funcionalidades herméticas o inaccesibles.
- Herramienta de utilidad en el campo de la investigación para cualquier otra aplicación además de para velocidades de combustión laminar, con la utilidad de poder extraer información gráfica a partir de una fuente de artículos e investigaciones sobre un tema concreto.

A partir de estos objetivos planteados, se ha desarrollado una aplicación con la herramienta Microsoft Excel, continuando con el antecedente de Luis Mayo y otros trabajos del laboratorio. Además, toda la programación necesaria se realiza con el explorador de proyectos VBA de Microsoft (Virtual Basic para Aplicaciones).

El alcance de esta aplicación se ha planteado de cara a incluir algunas investigaciones para los combustibles abordados en el Proyecto: gasolina convencional y PRFs, gas natural como metano, e hidrógeno. De ellos se podrá obtener la velocidad de combustión laminar de cada combustible individual, para todas las opciones disponibles de temperatura y presiones en cada artículo.

## 3.2. Estructura de la información en Excel

Toda la información bibliográfica se ha organizado de forma que esté contenida en un único archivo de Excel, manteniendo el formato de libro. De esta forma, cada pestaña u hoja recoge la referencia a un artículo de estudio de velocidad de combustión laminar para cada uno de los combustibles.

Cada una de estas hojas de recopilación, o “fichas” de ahora en adelante, contienen toda la información relevante del artículo de fuente, clasificada de una forma homogénea para todas y recogiendo las diferentes condiciones de temperatura, presión o dosado a las que están sujetas las condiciones experimentales.

Las tres primeras hojas o pestañas del archivo Excel, son diferentes a las fichas de bibliografía. La primera de ellas se diseña como un interfaz para el usuario, titulado como “Calculadora de velocidades de combustión laminar” y está modelada como buscador de las diferentes fichas bibliográficas, para extraer la información gráfica de manera rápida. La segunda hoja es un auxiliar para este interfaz o calculadora, que exporta las tablas de datos directamente de las fichas para ser utilizadas por el usuario. Por último, la tercera pestaña se trata de un listado, a modo de índice, que recopila la información que contienen las fichas.

La estructura interna de estas hojas que se han diseñado se detalla a continuación.

### 3.2.1. Fichas de recopilación bibliográfica

Todas las fichas cuentan con el mismo formato, y la información se recoge en cada una de ellas en cuatro páginas. Para ilustrar la estructura, se ha escogido como ejemplo la ficha de “Gasolina Común”, correspondiente con la gasolina estudiada por Heywood [16]. En la primera página, se incluye toda la información de referencia del artículo o libro de la fuente, tal y como se ilustra en la Figura 3.1.

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| <b>GASOLINA<br/>COMÚN</b>   |   |
| <b>FUENTE BIBLIOGRÁFICA</b> |   |
| PUBLICACIÓN                 | INTERNAL COMBUSTION ENGINE FUNDAMENTALS, CAPÍTULO 9: COMBUSTION IN SPARK-IGNITION ENGINES   |
| AUTOR/ES                    | JOHN B. HEYWOOD   |
| EDICIÓN                     | MC GRAW HILL SERIES IN MECHANICAL ENGINEERING   |
| AÑO                         | 1988  |
| ISSN/ISBN                   | 978-1-26-011611-3   |
| ENLACE                      | <a href="https://almena.uva.es/permalink/34BUC_UVA/eseo99/alma991003500659705774">https://almena.uva.es/permalink/34BUC_UVA/eseo99/alma991003500659705774</a> |
| PUBLICACIÓN                 | MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS, CAPÍTULO 18: COMBUSTIÓN EN MEP  |
| AUTOR/ES                    | EDITORES LIBRO: J.M. DESANTES, F. PAYRI - AUTORES CAPÍTULO: F.V. TINAUT, J.J. LÓPEZ   |
| EDICIÓN                     | EDITORIAL REVERTÉ, EDITORIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA  |
| AÑO                         | 2011  |
| ISSN/ISBN                   | 978-84-8363-705-0   |
| ENLACE                      | <a href="https://almena.uva.es/permalink/34BUC_UVA/eseo99/alma991000535189705774">https://almena.uva.es/permalink/34BUC_UVA/eseo99/alma991000535189705774</a> |

Figura 3.1. Ficha de recopilación bibliográfica: ejemplo de entrada de fuente.

En este caso, se cuentan con dos fuentes diferentes, pues ha sido de utilidad tanto la publicación original de Heywood como el libro de MCIÁ que se ha venido utilizando a lo largo del desarrollo de este Proyecto [4]. Además, se incluye un enlace directo para acceso rápido online, para este ejemplo, por la web de la Biblioteca de la Universidad de Valladolid, Almena.

En esta primera página, también se recoge información acerca del combustible. Para el caso de las gasolinas, como se desarrolla en el epígrafe *2.4.1 Combustibles tradicionales: gasolina*, no se trata de combustibles puros e inalterables, por lo que se trata de documentar para cada caso su composición y propiedades. Continuando con el caso de la gasolina de Heywood, extraída de un artículo de Rhodes y Keck [49], se añade la Figura 3.2.

| COMBUSTIBLE  |  |
|--------------|--|
| TIPO         | GASOLINA   |
| NOMBRE       | RMFD 303   |
| COMPOSICIÓN  | SIN ESPECIFICAR  |
| PROPIEDADES  | PESO MOLECULAR MEDIO 107 KG/MOL, RELACIÓN H/C 1,69   |
| GAS RESIDUAL | COMPOSICIÓN: 80% N <sub>2</sub> , 20% CO <sub>2</sub>  |
| PUBLICACIÓN  | LAMINAR BURNING SPEED MEASUREMENTS OF INDOLENE-AIR-DILUENT MIXTURES AT HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES |
| AUTOR/ES     | DAVID B. RHODES, JAMES C. KECK   |
| EDICIÓN      | SAE INTERNATIONAL CONGRESS AND EXPOSITION  |
| AÑO          | 1985   |
| ISSN/ISBN    | ISSN: 0148-7191, e-ISSN: 2688-3627   |
| ENLACE       | <a href="https://doi.org/10.4271/1850047">https://doi.org/10.4271/1850047</a>                          |

Figura 3.2. Ficha de recopilación bibliográfica: ejemplo de entrada de combustible.

En la segunda página de la ficha, se recoge información sobre la metodología experimental, atendiendo a la clasificación realizada en el apartado de este Trabajo *2.3.4. Metodologías experimentales para su medida*. Además, se incluyen los esquemas adaptados de la instrumentación de laboratorio que se hace referencia en el artículo, se detallan sus características, o se indica el procedimiento de modelado con software en cada caso. Se ilustra esta entrada con la Figura 3.3.

Completando esta segunda página sobre la experimentación, se acompaña con un punto fundamental de la recopilación: las expresiones de cálculo de la velocidad de combustión laminar para cada combustible en función de su estudio de origen.

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

MÉTODO  
CLASIFICACIÓN  
INSTRUMENTAL

BOMBA DE COMBUSTIÓN ESFÉRICA CON IGNICIÓN CENTRAL  
LLAMAS QUE SE PROPAGAN LIBREMENTE, BOMBA, MEDIDA DE LA PRESIÓN  
TRANSDUCTOR PIEZOELECTRICO KISTLER 603B1, AMPLIFICADOR 504A, MICROPROCESADOR ADAC 1000, OSCILOSCOPIO

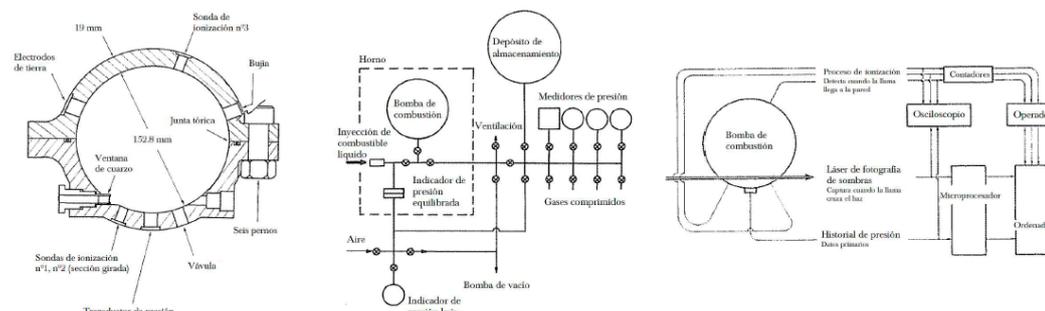


Figura 3.3. Ficha de recopilación bibliográfica: ejemplo de entrada de metodología experimental.

En base a la información teórica analizada en el epígrafe 2.3.2. *Expresiones de cálculo y tasa de stretch*, se recogen para cada fuente las expresiones matemáticas que permiten el cálculo de los diferentes parámetros hasta obtener los valores de la velocidad de combustión laminar.

Además de las expresiones, se recogen conjuntamente los rangos de validez para cada metodología. De esta forma, quedan agrupadas todas las condiciones de la fuente, lo que permite comparar unos tipos de gráfica con otras de los mismos combustibles, pero con diferentes autores o métodos. Se representa en la Figura 3.4.

## EXPRESIONES DE CÁLCULO

| CORRELACIÓN     | METGHALCHI Y KECK   | Presión en C.R. | Temperatura en C.R. |
|-----------------|---|-----------------|---------------------|
| RANGO VALIDEZ   | PRESIÓN: 1 BAR - 8 BAR, TEMPERATURA: 298K - 700K  | $P^0$           | $T^0$               |
| C.REFERENCIA    | PRESIÓN: 1 BAR - TEMPERATURA: 298K  | bar             | K                   |
| EXP. PRINCIPAL  | $u_L [cm/s] = u_L^0 \cdot \left(\frac{T}{T^0}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{P}{P^0}\right)^\beta$ | 1               | 298                 |
| EXP. AUXILIARES | $u_L^0 [cm/s] = 30,5 - 54,9 \cdot (\varphi - 1,21)^2$   |                 |                     |
|                 | $\alpha = 2,4 - 0,271 \cdot \varphi^{3,51}$   |                 |                     |
|                 | $\beta = -0,357 + 0,14 \cdot \varphi^{2,77}$  |                 |                     |

Figura 3.4. Ficha de recopilación bibliográfica: ejemplo de entrada de expresiones de cálculo.

Además, en el extremo derecho se recogen las condiciones de referencia (C.R.) de presión y temperatura que se utilizan en el artículo. Estos datos son fundamentales para el cálculo, y se utilizan en las fórmulas introducidas en las tablas de datos mostradas posteriormente.

La mayoría de las expresiones utilizan como origen la correlación de Metghalchi y Keck [31], con diferentes adaptaciones y variables. Otras correlaciones encontradas han sido de Ömer L. Gülder [50], para el metano; o de Iijima y Takeno [51], para el hidrógeno. Para otro grupo de estudios, los datos recogidos no se acompañan de expresiones matemáticas a partir de algún tipo de correlación, si no que solamente se dispone de la gráfica obtenida a partir del método experimental en el laboratorio. Se consigue la expresión matemática a partir de una interpolación polinómica de los datos, para grado tres. Se detalla para cada una de las fichas bibliográficas que corresponde.

Los resultados de aplicar estas expresiones matemáticas para cada artículo, introducidas como fórmulas de Excel, se agrupan en la tercera página de la ficha, con el nombre de tablas de datos. En la Figura 3.5 se muestra el ejemplo de los valores calculados para la gasolina de Heywood. Para cada tabla de datos, se distinguen todos los parámetros, escogiendo dos temperaturas concretas a modo de ejemplo para cada ficha.

## TABLAS DE DATOS

### GASOLINA COMÚN 1 BAR 300 K

| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |                         |   | PARÁMETROS DE CÁLCULO                                      |   |  |  |   | PARÁMETROS DE GRÁFICA                         |  |
|--------------------------|-------------------------|---|--|---|--|--|---|---|--|
| Presión<br>$P$<br>bar    | Temperatura<br>$T$<br>K | Dosado relativo<br>$\phi$<br>[unidimensional] | Velocidad de combustión laminar en C.R.<br>$u_L^0$<br>cm/s | Relación de temperaturas<br>$T/T^0$<br>[unidimensional] | Coef. termodinámico de temperatura<br>$\alpha$<br>[unidimensional] | Relación de presiones<br>$P/P^0$<br>[unidimensional] | Coef. termodinámico de presión<br>$\beta$<br>[unidimensional] | Dosado relativo<br>$\phi$<br>[unidimensional] | Velocidad de combustión laminar<br>$u_L$<br>cm/s |
| 1                        | 300                     | 0,3   | -14,96   | 1,01  | 2,3960   | 1,00   | -0,3520   | 0,3   | -15,20   |
| 1                        | 300                     | 0,4   | -5,52  | 1,01  | 2,3891   | 1,00   | -0,3459   | 0,4   | -5,61  |
| 1                        | 300                     | 0,5   | 2,82   | 1,01  | 2,3762   | 1,00   | -0,3365   | 0,5   | 2,87   |
| 1                        | 300                     | 0,6   | 10,07  | 1,01  | 2,3549   | 1,00   | -0,3230   | 0,6   | 10,23  |
| 1                        | 300                     | 0,7   | 16,22  | 1,01  | 2,3225   | 1,00   | -0,3049   | 0,7   | 16,47  |
| 1                        | 300                     | 0,8   | 21,27  | 1,01  | 2,2762   | 1,00   | -0,2815   | 0,8   | 21,60  |
| 1                        | 300                     | 0,9   | 25,22  | 1,01  | 2,2128   | 1,00   | -0,2524   | 0,9   | 25,60  |
| 1                        | 300                     | 1   | 28,08  | 1,01  | 2,1290   | 1,00   | -0,2170   | 1   | 28,48  |
| 1                        | 300                     | 1,1   | 29,84  | 1,01  | 2,0213   | 1,00   | -0,1747   | 1,1   | 30,24  |
| 1                        | 300                     | 1,2   | 30,49  | 1,01  | 1,8861   | 1,00   | -0,1250   | 1,2   | 30,88  |
| 1                        | 300                     | 1,3   | 30,06  | 1,01  | 1,7194   | 1,00   | -0,0674   | 1,3   | 30,40  |
| 1                        | 300                     | 1,4   | 28,52  | 1,01  | 1,5172   | 1,00   | -0,0014   | 1,4   | 28,81  |
| 1                        | 300                     | 1,5   | 25,88  | 1,01  | 1,2753   | 1,00   | 0,0734  | 1,5   | 26,10  |
| 1                        | 300                     | 1,6   | 22,15  | 1,01  | 0,9893   | 1,00   | 0,1577  | 1,6   | 22,30  |
| 1                        | 300                     | 1,7   | 17,32  | 1,01  | 0,6548   | 1,00   | 0,2518  | 1,7   | 17,39  |

Figura 3.5. Ficha de recopilación bibliográfica: ejemplo de entrada de tablas de datos.

Por un lado, se agrupan los parámetros de definición, que son la presión, la temperatura y el dosado relativo para cada punto. Por otro lado, se recogen los parámetros de cálculo, asociados a la correlación de Metghalchi y Keck, formados por la velocidad de combustión laminar en condiciones de referencia  $u_L^0$ , la relación de temperaturas y presiones, y los coeficientes termodinámicos de temperatura y presión.

Por último, como parámetros de gráfica se agrupan conjuntamente el dosado relativo y la velocidad de combustión laminar  $u_L$ , para facilitar la selección de datos desde el gráfico y la claridad visual de los resultados.

Finalmente, en la cuarta hoja de la ficha recoge la representación gráfica de la velocidad de combustión laminar  $u_L$  calculada u obtenida mediante experimentación para cada artículo, frente al dosado relativo de la mezcla de combustible, como se muestra en la Figura 3.6. Esta información gráfica será la mostrada posteriormente en la Calculadora de velocidades de combustión laminar.

## GRÁFICAS

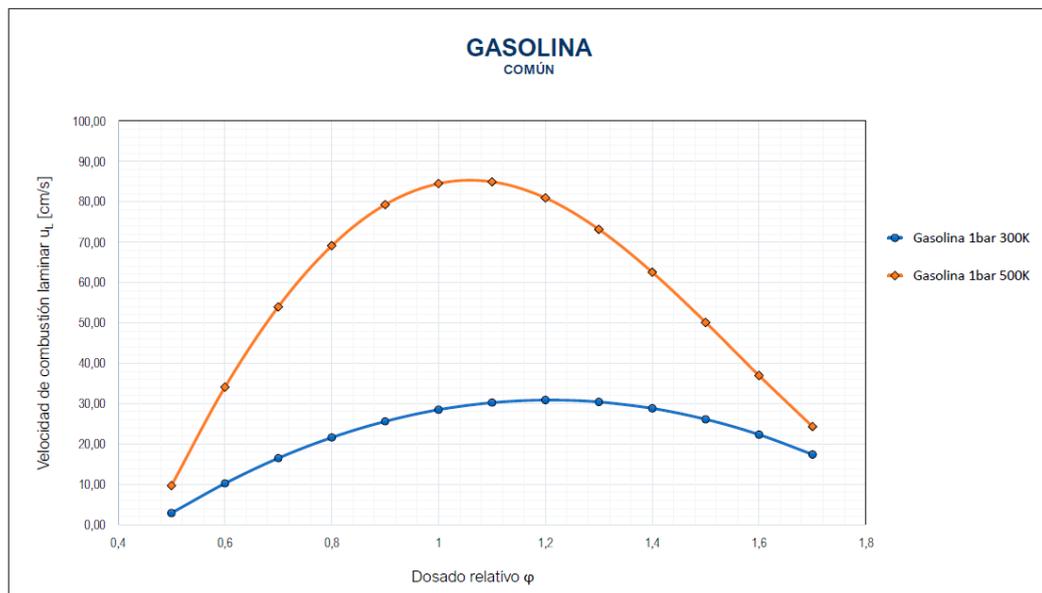


Figura 3.6. Ficha de recopilación bibliográfica: ejemplo de entrada de gráfico.

Para el caso en el que se obtienen las expresiones matemáticas a partir de los datos de la gráfica, además se añade la imagen comparativa de los puntos extraídos con

respecto a los del artículo original. Se muestra en la Figura 3.7, como ejemplo del caso de la pestaña para la Gasolina CR-87.

GRÁFICA ARTÍCULO ORIGINAL

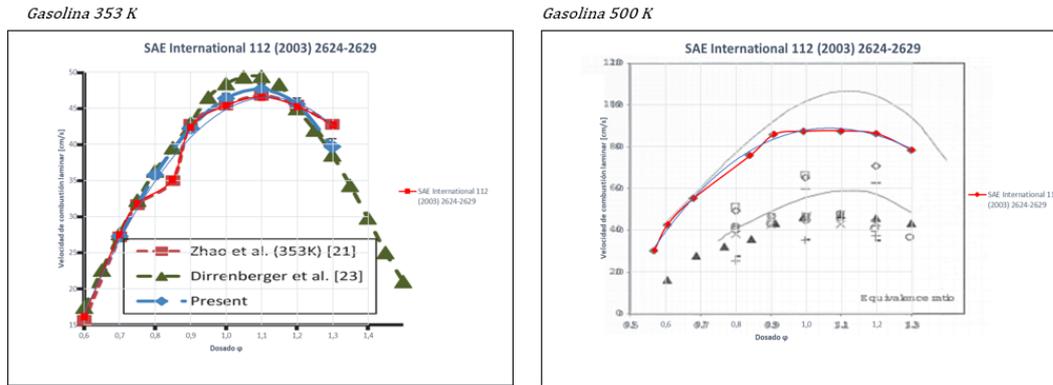


Figura 3.7. Ficha de recopilación bibliográfica: ejemplo de entrada de gráficas de artículo original.

### 3.2.2. Listado

Como se indicaba anteriormente, además de las fichas de recopilación bibliográfica, se crean otras tres pestañas con diferente utilidad. En la Figura 3.8 se muestra esta pestaña.

| COMBUSTIBLES |                             |                                  | POSIBILIDADES |                             |               |               |
|--------------|-----------------------------|----------------------------------|---------------|-----------------------------|---------------|---------------|
|              |                             | IR                               |               | Temperatura [K]             | Presión [bar] |               |
| 1            | Gasolina Común              | <input checked="" type="radio"/> | 1             | Gasolina Común              | [ 298 - 700 ] | [ 1 - 8 ]     |
| 2            | Gasolina Común ERG-Trapping | <input type="radio"/>            | 2             | Gasolina Común ERG-Trapping | [ 298 - 700 ] | [ 1 - 8 ]     |
| 3            | Gasolina Exxon 708629-60    | <input type="radio"/>            | 3             | Gasolina Exxon 708629-60    | 358           | 1             |
| 4            | Gasolina CR-87              | <input type="radio"/>            | 4             | Gasolina CR-87              | 353           | 1             |
| 5            | Gasolina TAE7000            | <input type="radio"/>            | 5             | Gasolina TAE7000            | 500           | 1             |
| 6            | Iso-octano Heywood          | <input type="radio"/>            | 6             | Gasolina TAE7000            | 358           | 1             |
| 7            | Iso-octano Sileghem         | <input type="radio"/>            | 7             | Iso-octano Heywood          | [ 298 - 700 ] | [ 1 - 8 ]     |
| 8            | n-Heptano Heywood           | <input type="radio"/>            | 8             | Iso-octano Sileghem         | 298           | 1             |
| 9            | n-Heptano Sileghem          | <input type="radio"/>            | 9             | n-Heptano Heywood           | 358           | 1             |
| 10           | Tolueno Heywood             | <input type="radio"/>            | 10            | n-Heptano Sileghem          | [ 298 - 700 ] | [ 1 - 8 ]     |
| 11           | Tolueno Sileghem            | <input type="radio"/>            | 11            | Tolueno Heywood             | 298           | 1             |
| 12           | Metano Reyes                | <input type="radio"/>            | 12            | Tolueno Sileghem            | 358           | 1             |
| 13           | Metano Bougrine             | <input type="radio"/>            | 13            | Metano Reyes                | [ 300 - 480 ] | [ 1 - 7 ]     |
| 14           | Metano de Goeij             | <input type="radio"/>            | 14            | Metano Bougrine             | [ 0 - 950 ]   | [ 1 - 110 ]   |
| 15           | Metano Dirrenberger         | <input type="radio"/>            | 15            | Metano de Goeij             | [ 293 - 353 ] | [ 0,6 - 1,6 ] |
| 16           | Metano Tahtouh              | <input type="radio"/>            | 16            | Metano Dirrenberger         | 300           | 1             |
| 17           | Hidrógeno Verhelst          | <input type="radio"/>            | 17            | Metano Tahtouh              | 300           | 1             |
| 18           | Hidrógeno Iijima            | <input type="radio"/>            | 18            | Hidrógeno Verhelst          | [ 500 - 900 ] | [ 5 - 45 ]    |
| 19           | Hidrógeno Gerke             | <input type="radio"/>            | 19            | Hidrógeno Iijima            | [ 291 - 500 ] | [ 0,5 - 25 ]  |
|              |                             |                                  | 19            | Hidrógeno Gerke             | [ 350 - 700 ] | [ 10 - 45 ]   |

Figura 3.8. Listado completo de combustibles y combinaciones de temperatura y presión.

Comenzando con la de “Lista”, en ella se agrupan a modo de índice o resumen, las diferentes opciones que se han recopilado y que se podrán elegir desde la Calculadora. Más adelante, en el *Capítulo 4: Resultados*, se detalla este contenido. Se añade un enlace directo, a la derecha de la columna de combustibles, para acceder a la ficha correspondiente con facilidad.

### 3.2.3. Auxiliar Interfaz

Esta segunda pestaña del Excel se crea sin la finalidad de que el usuario tenga que interactuar con su contenido. Se trata de un punto común entre las fichas de recopilación bibliográfica y el interfaz de usuario o calculadora. Sobre ella, se extraen los datos de velocidad de combustión laminar frente al dosado, según la selección del usuario, y a partir de las fórmulas y valores que se presentan en las fichas.

Estos datos serán los que se representen directamente en la calculadora, y que el usuario podrá visualizar. De esta forma, el contenido de las fichas no es alterado en cada búsqueda, y el usuario podría además realizar modificaciones en función de las necesidades, como obtener más puntos para cada gráfica o descartar valores negativos.

En la pestaña de “Listado”, se puede distinguir que, entre las diferentes opciones presentadas a partir de los artículos, algunos de ellos extraen información de la velocidad de combustión laminar ante valores fijos de temperatura y presión, mientras que otros permiten un rango de entrada. Por lo tanto, se distinguen dos modelos de extracción de los datos a los que puede acceder el usuario, el primero se nombra como “Datos Fijos” y el segundo como “Introducción de Datos”.

En la Figura 3.9 se observa esta pestaña completa, con ambas opciones. En la parte superior, se indica el tipo de auxiliar que se está utilizando en función de la elección del usuario. Esta selección, a modo de recuadro sombreado, se realiza de forma automática en función de la búsqueda, a partir de los módulos de programación que se detallarán más adelante.

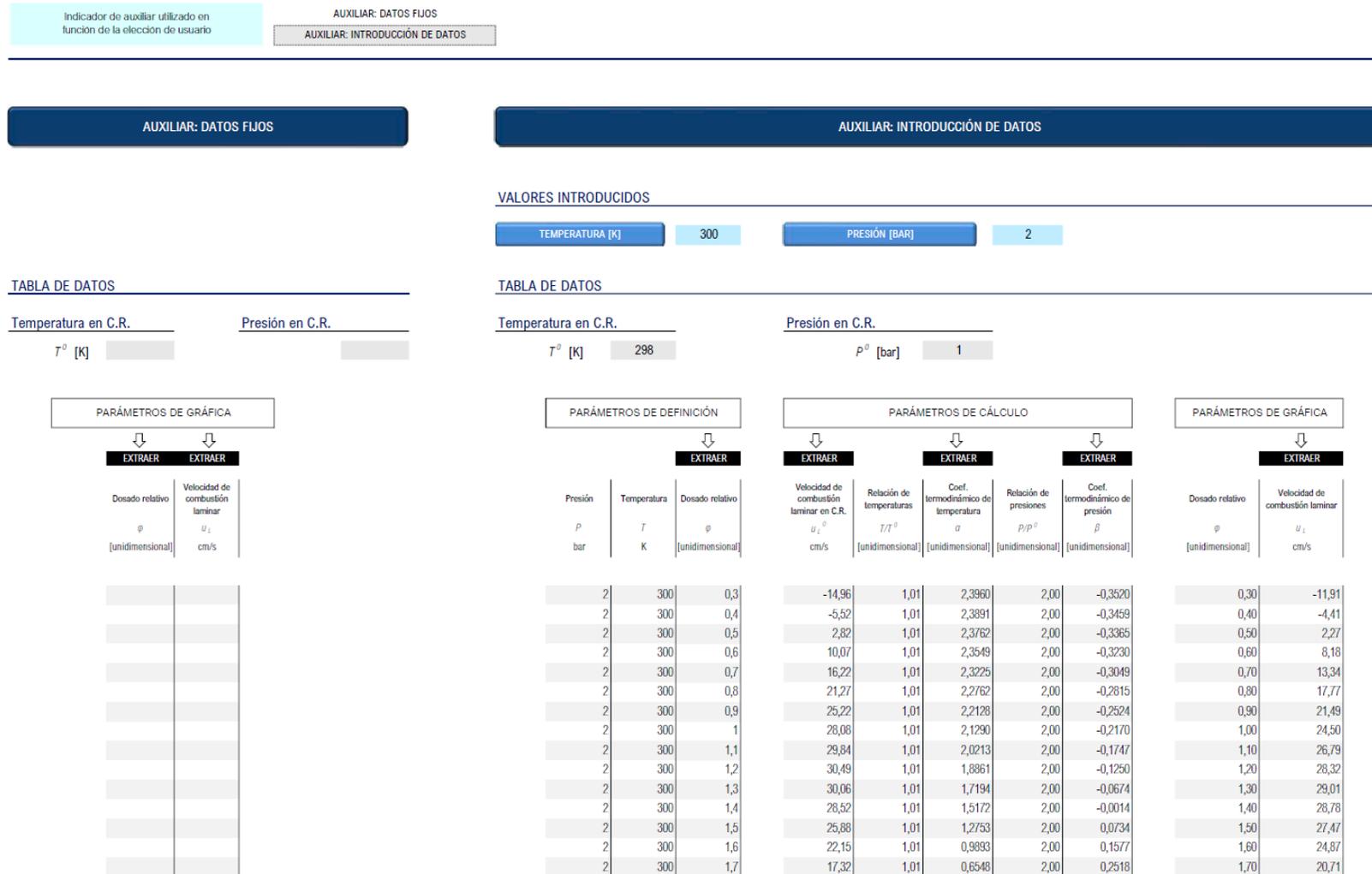


Figura 3.9. Auxiliar interfaz con opción de selección de datos fijos e introducción de datos.

El ejemplo se corresponde con una búsqueda para la gasolina común, en la que se han introducido como datos 300 K de temperatura y 2 bares de presión. Estos valores introducidos, en las celdas azules, también se autocompletan, ya que están vinculadas a la introducción de la calculadora.

Para el resto de los datos, se mantiene la misma distribución de columnas de las fichas. Sobre ellas, se copiarán las fórmulas y expresiones matemáticas desarrolladas, para los valores introducidos. Concretamente, la aplicación copiará datos en aquellas columnas señalizadas con el cuadro “Extraer”, incluido para facilitar la identificación de estas columnas ante futuras modificaciones o utilidades.

De esta forma, la gráfica que podrá visualizar el usuario tomará los datos de las columnas “Parámetros de gráfica”, sin que el usuario necesite realizar ninguna acción sobre esta pestaña o sobre las fichas.

### 3.2.4. Interfaz Usuario. Calculadora velocidades de combustión laminar

Por último, la primera pestaña que se ha diseñado en la aplicación es la de interacción con el usuario, nombrada como “Calculadora de velocidades de combustión laminar”. Se muestra a continuación en la Figura 3.10.

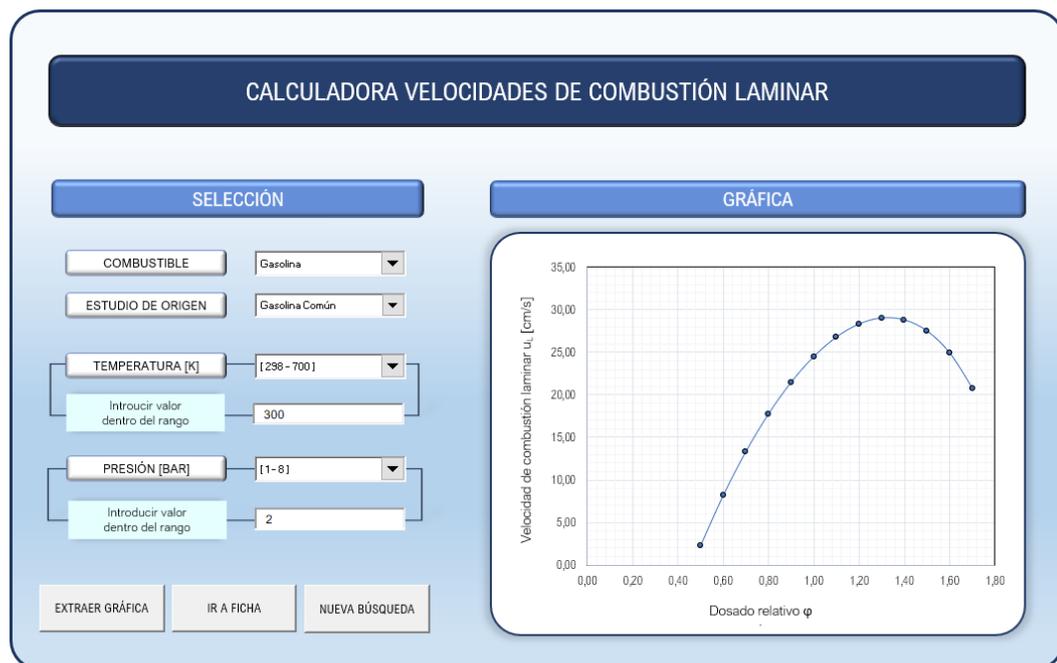


Figura 3.10. Interfaz de usuario nombrado como Calculadora de velocidades de combustión laminar.

Se diseña con las opciones de control de formulario y ActiveX disponibles en Excel. De esta forma, el usuario puede seleccionar de forma sencilla la opción a evaluar de entre las posibilidades que se mostraban en 3.2.2. *Listado*. A partir de la elección del combustible, las opciones que aparecen en el formulario “Estudio de origen” se corresponderán solo con las disponibles para este combustible seleccionado. Lo mismo ocurre con los formularios de temperatura y de presión.

Para el caso de los artículos cuya experimentación contempla un rango de temperaturas y presiones, aparece la opción de introducir un valor numérico dentro de este rango, con el que se realizan los cálculos. Para los artículos que solo cuentan con valores fijos de temperatura y presión, esta opción se mantiene oculta.

Por último, se añaden tres botones al final de la columna “Selección”. El último paso tras una búsqueda sería el de pulsar el botón de “Extraer Gráfica”, que permite ejecutar la macro correspondiente que extrae los datos en la pestaña “Auxiliar Interfaz” desde las fichas, y automáticamente se representan en la gráfica. El segundo botón, permite tener un enlace directo a la ficha original. El tercero, es importante a tener en cuenta tras cada búsqueda, pues permite borrar los datos extraídos de las fichas e iniciar una selección nueva.

Esta pestaña de Calculadora se diseña con un formato sencillo para el usuario, mediante la programación realizada con Microsoft VBA, que se encarga de ir creando la visualización de los formularios según cada selección y de extraer la gráfica final. De esta forma la búsqueda se realiza de forma intuitiva y es adaptable.

### 3.3. Estructura de la programación en VBA

Microsoft VBA (*Visual Basic for Applications*) es una implementación del lenguaje de programación orientado a eventos de Microsoft, conocido como Visual Basic 6, que puede utilizarse en todas las aplicaciones del paquete Microsoft de manera gratuita, lo que supone uno de los pilares de su popularidad y su extendido uso en el mundo. El entorno de Visual Basic permite construir funciones definidas por el usuario, a través de macros (abreviatura de macroinstrucciones), que permiten automatizar una secuencia de procesos ante un desencadenante o evento [52].

Las macros pueden asignarse a los formularios y botones que se han añadido en la pestaña de “Interfaz Usuario”. El código que se desarrolla en el entorno VBA de Excel se organiza en diferentes módulos, de forma que cada módulo contiene un número determinado de macros o funciones que se han programado para que realicen una acción. El conjunto de estos módulos constituye un proyecto en VBA.

Para estructurar la programación necesaria para la Calculadora de velocidades de combustión laminar, se han dividido estas macros en siete módulos diferentes, como se muestran en la Figura 3.11. A continuación, se detalla brevemente el contenido de cada módulo y su utilidad.

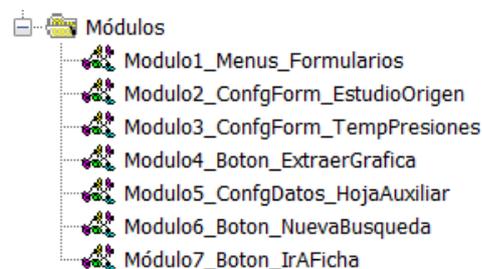


Figura 3.11. Listado de módulos que configuran el proyecto en VBA.

### 3.3.1. Contenido y funciones de los módulos

Estos siete módulos que se han creado agrupan un conjunto de funciones o macros con una utilidad común, y se detallan a continuación. Como primera visión global, el primer módulo será el módulo de control o de selección, que ejecuta las tareas siguientes en función de cada elección del usuario. Controla los módulos dos y tres, como módulos auxiliares y de configuración, que irán completando el siguiente paso a cada decisión del usuario.

El cuarto módulo es el que se asocia al botón “Extraer Gráfica”, e igual que el módulo primero, será el control necesario para que el módulo quinto complete la hoja “Auxiliar Interfaz” con los datos necesarios para visualizar en la gráfica. Finalmente, los módulos sexto y séptimo completan las tareas auxiliares necesarias de poder limpiar la pestaña “Auxiliar Interfaz” para la siguiente búsqueda, y las selecciones de los formularios; además de poder acceder rápidamente a la ficha de la cual se extraen los datos en cada búsqueda.

En la Tabla 3.1, se recoge de forma esquemática la estructura de la programación.

|   |                                    |  |
|---|------------------------------------|--|
| <b>Módulo 1</b><br>Menús Formularios                                | Menús Formularios                  | Estudio de Origen<br>Temperatura y Presión                     |
|   | Diseño Interfaz                    | Ocultar Introducción de Datos<br>Mostrar Introducción de Datos |
|   |                                    |  |
| <b>Módulo 2</b><br>Configuración Formulario Estudio de Origen       | Formulario Estudio Origen          | Gasolinas  |
|   |                                    | Isoctanos  |
|   |                                    | nHeptanos  |
|   |                                    | Toluenos   |
|   |                                    | Metanos  |
|   |                                    | Hidrógenos   |
| <b>Módulo 3</b><br>Configuración Formulario Temperatura y Presiones | Formulario Temperatura Presión     | Gasolina Común<br><i>etc. (una función por Ficha)</i>          |
|   |                                    | Hidrógeno Gerke  |
|   |                                    |  |
| <b>Módulo 4</b><br>Botón Extraer Gráfica                            | Menú Botón Extraer Gráfica         |  |
|   | Auxiliar Opción                    | Datos Fijos<br>Introducción de Datos                           |
|   | Selección de Datos Extraer Gráfica |  |
| <b>Módulo 5</b><br>Configuración Datos Hoja Auxiliar                | Extracción Datos                   | Gasolina Común<br><i>etc. (una función por Ficha)</i>          |
|   |                                    | Hidrógeno Gerke  |
|   |                                    |  |
| <b>Módulo 6</b><br>Botón Nueva Búsqueda                             | Borrar Datos Nueva Búsqueda        |  |
| <b>Módulo 7</b><br>Botón Ir a Ficha                                 | Botón Ir a Ficha                   |  |

Tabla 3.1. Resumen esquemático de los módulos de programación en VBA con las macros que incluyen.

### 3.3.1.1. Módulo 1. Menús Formularios

Este primer módulo, que se ha definido anteriormente como de control, cuenta con dos macros o funciones principales, y otras dos secundarias. Las macros principales se han nombrado “Menús Formularios”, para el formulario “Estudio de Origen” y “Temperatura” y “Presión” que aparecían en la pestaña de Interfaz Usuario.

La utilidad de las macros de Menús es la de rellenar estos formularios con las opciones disponibles en función de la elección de combustible del usuario. Por ejemplo, si el usuario selecciona una búsqueda para el combustible “Gasolina”, el formulario Estudio Origen solo mostrará las opciones disponibles para la gasolina, es decir las que se corresponden con las pestañas de Gasolina Común, Gasolina con recirculación ERG-Trapping, Gasolina Exxon 708629-60, etc. Según las opciones que se recogen en el Listado, como se muestra en la Figura 3.12. Esta utilidad facilita que la búsqueda se realice de forma muy intuitiva.

The image shows a software interface with a light blue background. At the top is a blue button labeled 'SELECCIÓN'. Below it are three rows of controls. The first row has a button labeled 'COMBUSTIBLE' and a dropdown menu with 'Gasolina' selected. The second row has a button labeled 'ESTUDIO DE ORIGEN' and a dropdown menu with a list of gasoline types: 'Gasolina Común', 'Gasolina Común ERG-Trapping', 'Gasolina Exxon 708629-60', 'Gasolina CR-87', and 'Gasolina TAE7000'. The third row has a button labeled 'TEMPERATURA [K]' which is currently disabled (greyed out).

Figura 3.12. Ejemplo de completado de formulario Estudio de Origen en función de la búsqueda Gasolina.

Del mismo modo, el Menú creado para los formularios de Temperatura y Presión, permitirá seleccionar las posibilidades disponibles para el Estudio de Origen concreto. Por ejemplo, si se ha seleccionado la Gasolina CR-87, aparecerán las dos temperaturas disponibles 353K y 500K. De esta forma el usuario es guiado en la búsqueda. A nivel de programación, se consigue mediante estructuras Select Case.

Las dos macros auxiliares de mostrar y ocultar Introducción de Datos, permiten que las entradas de datos permanezcan ocultas cuando el artículo seleccionado solo permita valores concretos de temperatura y presión. Este detalle permite facilitar aún más la búsqueda, según se muestra en la Figura 3.13.

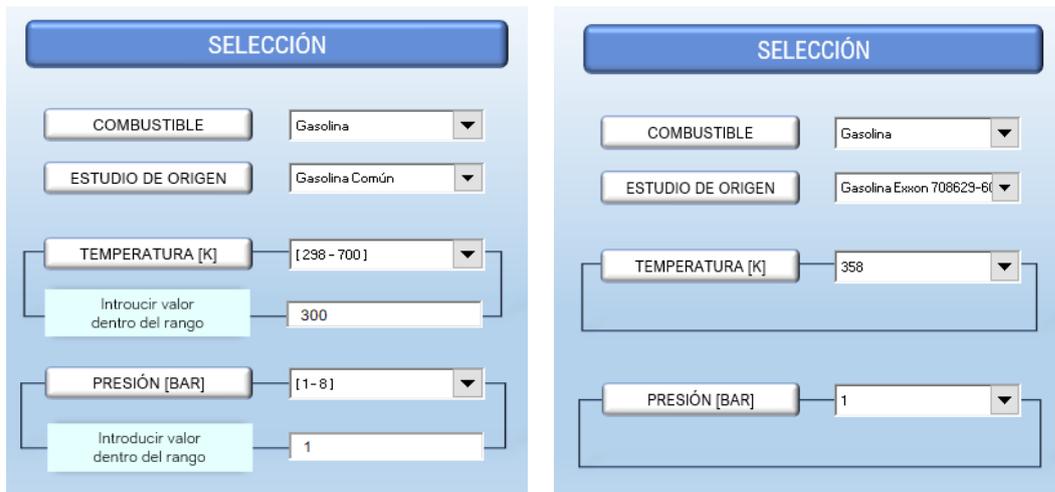


Figura 3.13. Ejemplo de cambio en el diseño de Selección en función de la posibilidad del usuario de introducir datos de entrada.

### 3.3.1.2. Módulo 2. Configuración Formulario Estudio de Origen

Como se ha indicado, el Módulo 1 actúa como control a los módulos 2 y 3. A partir de las funciones nombradas como “Formulario Estudio de Origen”, se configuran los formularios con las opciones directamente del Listado, ya que el Módulo únicamente actúa como selector, pero no realiza modificaciones directas en el Excel.

Concretamente, para el módulo 2, como se configura el Estudio de Origen, hay una macro por cada tipo de combustible que se estudia en este proyecto. Así se añaden las opciones que hay en la aplicación para todas las gasolinas, iso-octanos, n-heptanos, toluenos, metanos e hidrógenos.

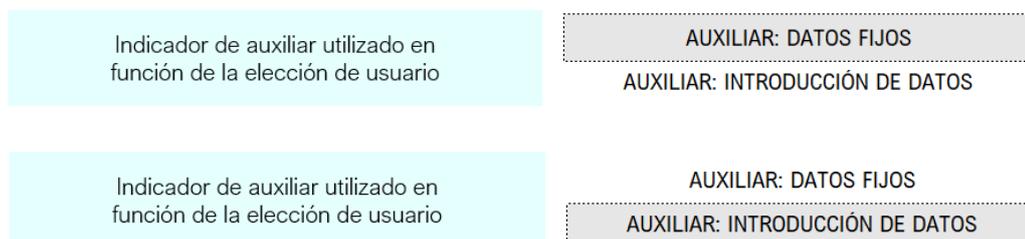
### 3.3.1.3. Módulo 3. Configuración Formulario Temperatura y Presión

Cuenta con la misma utilidad que se ha explicado para el módulo 2, pero esta vez, como se configuran los formularios Temperatura y Presión, existen opciones para cada una de las Fichas introducidas en la aplicación. Por lo tanto, en total se cuenta con 19 pequeñas macros que configuran estos formularios y a las que se accede con el Módulo 1. Estos módulos realizan funciones similares, pero se separan para mejorar la organización y el acceso para futuras ampliaciones.

### 3.3.1.4. Módulo 4. Botón Extraer Gráfica

El Módulo 4 se asigna al botón Extraer Gráfica, y su función es similar a la del Módulo 1, actúa como módulo de control y selector. Se encarga de llamar a la función específica para extraer los datos del combustible, estudio de origen, y temperatura y presión seleccionados; y copiar estos datos en la pestaña Auxiliar Interfaz. La macro principal de este módulo es el Menú Botón Extraer Gráfica, que realiza esta función de selección.

Además, se han desarrollado otras dos funciones auxiliares. La macro Auxiliar Opción prepara la pestaña Auxiliar Interfaz para conocer si la opción seleccionada pertenece al grupo que tiene definidos los valores concretos de temperatura y presión, o por el contrario si el usuario podrá introducir las condiciones según el rango. De esta forma, se podrán seleccionar correctamente los datos que se representarán en la gráfica. En la Figura 3.14 se observa la indicación visual de la función que realiza Auxiliar Opción.



**Figura 3.14.** Comprobación de la utilidad de la macro Auxiliar Opción, para escoger los valores correctos a graficar.

La otra función auxiliar que completa este módulo es la de Selección Datos Extraer Gráfica, que lee el resultado de la macro anterior, y así configura la gráfica para que tome los datos de una columna o de otra de la pestaña Auxiliar Interfaz.

### 3.3.1.5. Módulo 5. Configuración Datos Hoja Auxiliar

Este módulo es análogo a los módulos 2 y 3, pues se encarga de realizar la acción que controla el Módulo 4. Se compone de una macro Extracción Datos por cada una de las fichas introducidas en la aplicación, en total 19. Cuando el usuario pulsa el botón de Extraer Gráfica, la aplicación leerá la selección y ejecuta la macro que

se corresponde. Para cada ficha, se copian los datos pertinentes en la hoja Auxiliar Interfaz, que son los que están etiquetados con el letrero “Extraer”.

#### *3.3.1.6. Módulo 6. Botón Nueva Búsqueda*

Este último módulo, junto con el 7, son los más sencillos de todos. En concreto el Módulo 6 cuenta con una única macro, que se encarga de borrar el contenido de la hoja Auxiliar que se copió con el Módulo 5, y se asocia al tercer botón de Nueva Búsqueda. De esta forma, también se borra la gráfica dibujada en la pestaña de Interfaz Usuario. Por último, se reinician los formularios, quedando en blanco para una nueva búsqueda sin opción a errores.

#### *3.3.1.7. Módulo 7. Botón Ir a Ficha*

Finalmente, el Módulo 7 completa el último botón mostrado en la pestaña de Interfaz. Esta macro también actúa como un menú de control, y permite enlazar la ficha seleccionada con el botón, de forma que el usuario puede acceder rápidamente a la ficha de interés. La estructura también es de tipo Select Case.

### **3.3.2. Interacciones al realizar una búsqueda**

Uno de los objetivos principales del desarrollo de esta aplicación es que pueda ser fácilmente editable y ampliable por otros investigadores en el campo de los motores térmicos. Por ello, a continuación se muestran paso a paso las interacciones que tienen lugar entre los módulos y el Interfaz en el momento en el que se realiza una búsqueda, de manera esquemática mediante diagramas de flujos.

La finalidad es la de completar la explicación de la funcionalidad del proyecto en VBA, para favorecer posibles mejoras y líneas futuras de este proyecto. Para cada módulo, se expresa qué macro se ejecuta en el momento señalado de la búsqueda, y a que otra macro acude para completar la acción.

En el momento de inicio de la búsqueda, en primer lugar seleccionaríamos el combustible del que queremos extraer una gráfica. Según se ilustra en la Figura 3.15, automáticamente se ejecuta la macro Menú Formulario de Origen del Módulo

1 con el caso concreto de la gasolina, y provoca una llamada a Formulario Estudio Origen en el Módulo 2, para que en el formulario Estudio de Origen aparezcan las opciones de la gasolina.

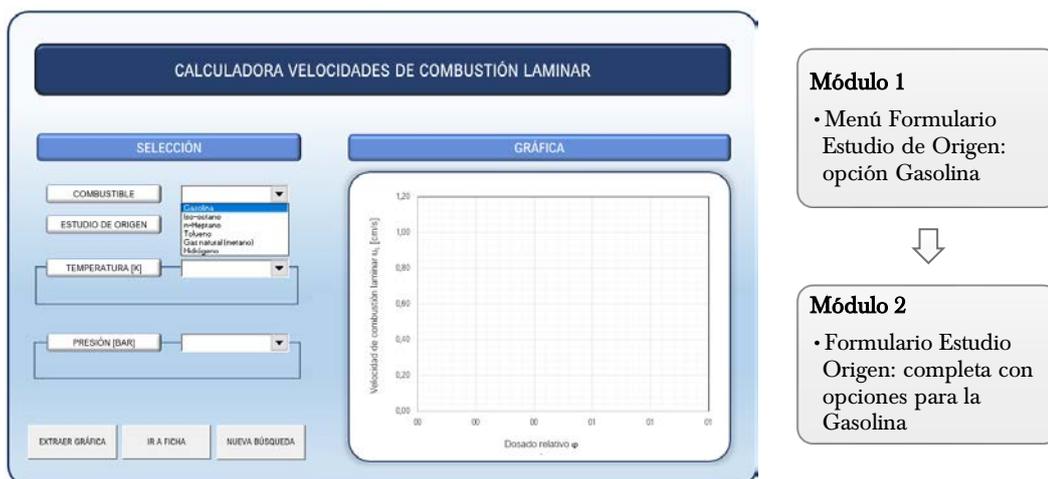


Figura 3.15. Interacciones de la programación con el Interfaz de búsqueda: selección de combustible.

El siguiente paso que realizaría el usuario es el de seleccionar qué estudio o artículo de origen quiere utilizar como fuente de datos de la gráfica que va a extraer. En este formulario solo aparecerán las opciones disponibles para la gasolina, según la interacción anterior. Según Figura 3.16, al elegir la Gasolina Común, el Módulo 1 ejecuta la macro Menú Formulario Temperatura Presión para configurar los siguientes formularios y que aparezcan los rangos de entrada, mediante la llamada al Módulo 3. Además, se mostrarán los cuadros de introducción de datos.

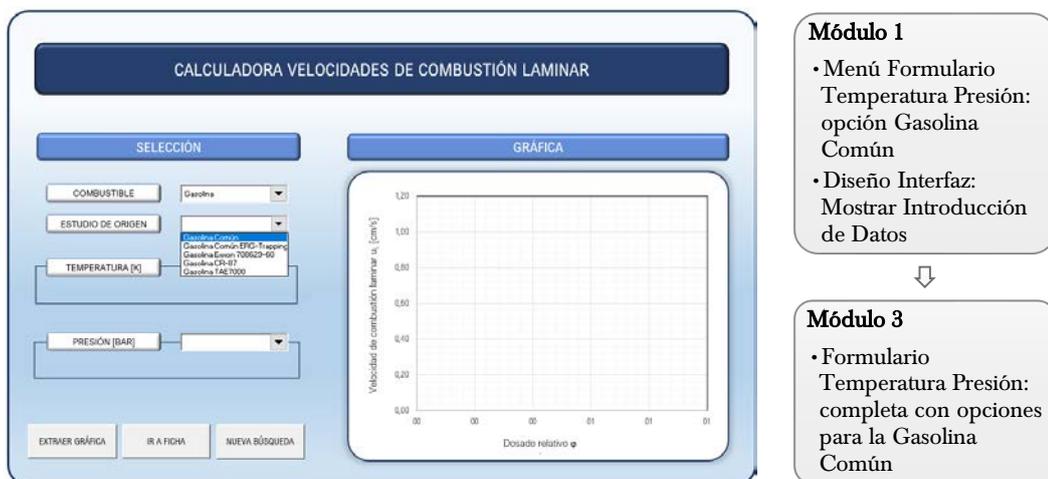


Figura 3.16. Interacciones de la programación con el Interfaz de búsqueda: selección de estudio de origen.

A continuación, seleccionaríamos la temperatura y presión a escoger. En este caso, como se cuenta con un rango, solo aparece el rango disponible. Para los artículos con diferentes opciones de temperatura, se muestran estas opciones. Una vez introducido el valor de temperatura y presión deseados como condiciones de estudio, se pulsaría el botón de Extraer Gráfica.

Según se esquematiza en la Figura 3.17, al pulsar el botón Extraer Gráfica, actúa el Módulo 4, de forma similar a lo realizado anteriormente por el Módulo 1. Se selecciona del menú la opción de extraer los datos de la ficha para la Gasolina Común de Heywood, que copiará los datos en la hoja Auxiliar Interfaz.

Para copiar los datos y expresiones de cálculo desde la ficha, el Módulo 4 acude al Módulo 5, que es el ejecutor de esta acción mediante la macro Configuración Datos Hoja Auxiliar. Una vez se completa la extracción de los datos, el Módulo 4 ejecuta la macro Auxiliar Opción configurará la página con la opción de entrada de datos, y la macro Selección Datos Extraer Gráfica, que permitirá a la gráfica tomar los datos ya correctos.

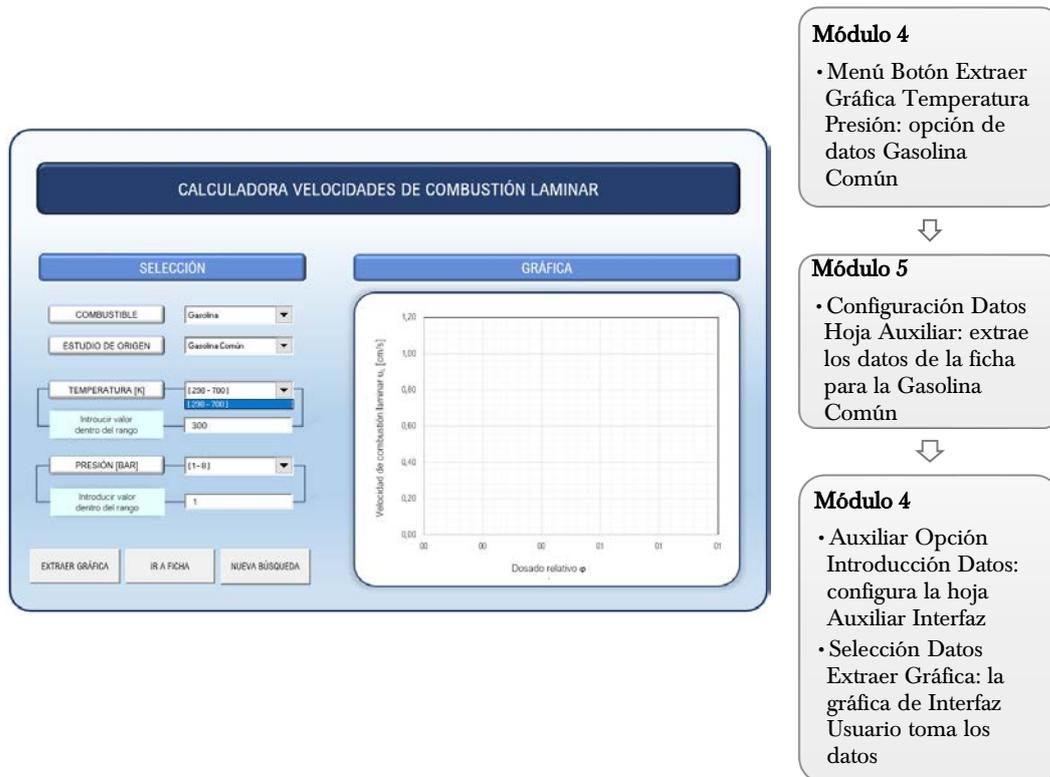
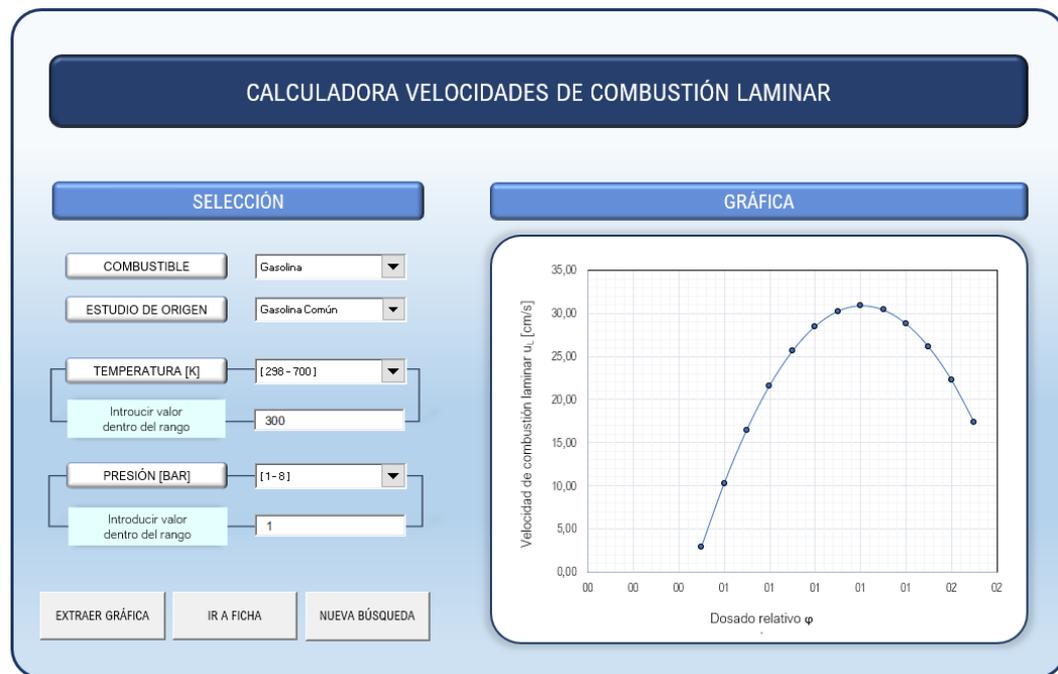


Figura 3.17. Interacciones de la programación con el Interfaz de búsqueda: extraer gráfica.

En la Figura 3.18 se muestra el resultado final de la búsqueda. Las opciones de introducción de datos están vinculadas directamente con la celda de Auxiliar Interfaz, por lo que se podrán cambiar estos valores cuantas veces se deseen, sin necesidad de realizar una búsqueda nueva cada vez. De esta forma se pueden hacer estudios paramétricos de manera rápida y práctica, comprobando la influencia de la temperatura por ejemplo a 300 K, 500 K y 700 K. Este tipo de estudios se detallarán en el *Capítulo 4: Resultados y comparaciones*.



**Figura 3.18.** Interacciones de la programación con el Interfaz de búsqueda: resultado final.

Finalmente, se pulsaría el botón de Nueva Búsqueda, ejecutándose el Módulo 6 para reiniciar el Interfaz y la hoja Auxiliar. Si se desea, el usuario podrá acudir a la Ficha correspondiente, en este caso para la Gasolina Común, y se ejecutaría el Módulo 7.

Mediante este desarrollo, se cumple el objetivo de hacer más accesible el trabajo de programación con la herramienta de proyectos VBA, de forma que cualquier investigador o usuario pueda utilizar la herramienta con una línea de partida y entendiendo el concepto de manera esquemática. Para añadir una nueva Ficha con un nuevo artículo de investigación, bastaría con seguir estas interacciones de los módulos, y añadir las nuevas macros en imitación de las actuales.



## Capítulo 4:

# Resultados y comparaciones

Una vez explicada la estructura y el contenido de la aplicación práctica que se ha desarrollado en Excel, en este Capítulo se recoge detalladamente el trabajo de recopilación que se ha realizado para cada tipo de combustible seleccionado en este proyecto. Al final del presente documento, en el apartado de *Anexos*, se recogen todas las fichas bibliográficas cuyo formato se ha presentado en el apartado 3.2. *Estructura de la información en Excel*, que completan este Capítulo.

Para cada tipo de combustible planteado, se comienza citando los artículos de referencia concretos de la revisión, junto con sus rangos de validez o condiciones experimentales, las diferentes metodologías de laboratorio y sus expresiones de cálculo. Posteriormente se exponen los resultados para cada uno, mediante un estudio paramétrico en el que se observará la influencia los cambios de temperatura y de presión en la velocidad. Finalmente, se realiza una comparativa entre los combustibles de origen alternativo respecto de la gasolina como combustible tradicional.

## 4.1. Gasolina convencional

Para el caso de las gasolinas, la principal fuente bibliográfica revisada es la del trabajo del investigador John B. Heywood, en su libro *Internal Combustion Engine Fundamentals*, capítulo 9 [16]. Estos mismos estudios también se citan y recopilan en el libro de *Motores de Combustion Interna Alternativos*, capítulo 18, en el que colaboran investigadores de la Universidad de Valladolid [4].

Como se ha citado en el epígrafe 2.4. *Combustibles*, la experimentación que utiliza gasolina es limitada debido a la dificultad de obtener resultados globales y repetibles. Por ello, el trabajo de Heywood es de amplio valor, ya que se consigue

obtener un rango de validez desde 1 bar hasta los 8 bar de presión, y desde los 298K hasta los 700K de temperatura, para la gasolina comercial RMFD 303.

Para obtener estos resultados, la metodología experimental que se utiliza requiere de una bomba de combustión esférica con ignición central, de la que se registra la presión mediante transductores piezoeléctricos. Los detalles y clasificación de los diferentes métodos experimentales se recogieron en el epígrafe *2.3.4. Metodologías experimentales para su medida*.

La información completamente detallada se recoge en la ficha nombrada como “Gasolina Común”. Además, también se ha incluido otra ficha que recoge las investigaciones con recirculación de gases de escape, conocido como ERG o Trapping.

Además de las investigaciones de Heywood, se encuentran otros tres estudios que utilizan gasolinas reales de tipo comercial, cuyas composiciones se detallan en cada una de las fichas. En primer lugar, para la gasolina Exxon 708629-60 a una temperatura de 358K, de Sileghem et al. [53]. La segunda referencia utiliza gasolina CR-87 para temperaturas de 353K y 500K, de Zhao et al. [41]. Por último, se recogen investigaciones para la gasolina TAE7000 a 358K, por Dirrenberger et al. [54].

Como metodología experimental, tanto Sileghem como Dirrengerber utilizan ambos el método de flujo de calor en un quemador de llama plana, mientras que las investigaciones de Zhao se basan en una llama de estancamiento de pared de chorro y velocimetría de imagen de partículas (PIV).

Los resultados de estas investigaciones son válidos para un valor concreto de la temperatura y a 1 bar, no cuentan con una correlación para un determinado rango de temperaturas y presiones. Por lo tanto, la expresión de cálculo de estas investigaciones se ha obtenido mediante una interpolación polinómica de los valores dados en la gráfica.

A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos realizando un estudio paramétrico, escogiendo como gasolina de análisis la estudiada por Heywood.

### 4.1.1. Estudio paramétrico: temperatura y presión

Los siguientes estudios paramétricos se realizan para cada uno de los combustibles que se han seleccionado en esta aplicación. Completan el trabajo realizado de estudio teórico, recopilación bibliográfica y desarrollo de la herramienta, ya que se utiliza la aplicación en Excel y VBA para obtener resultados experimentales a partir de los propios artículos de estudio, de manera ajena al laboratorio.

De esta forma, se obtienen conclusiones sobre el comportamiento de cada uno de los combustibles, comparándolos entre ellos, y observando la evolución ante cambios en sus condiciones experimentales. Para cada combustible, se realiza un estudio paramétrico para observar, en primer lugar, la influencia de la temperatura, y en segundo lugar, la influencia de la presión. Se mantiene uno de estos parámetros fijos, y se varía el contrario, recogiendo en cada gráfica estas variaciones y obteniendo conclusiones.

Para el caso de la gasolina, se ha escogido como artículo de estudio las investigaciones de Heywood. El rango de validez del estudio es de 298 K en condiciones de referencia hasta 700 K, por lo que se han tomado valores para los extremos del rango y para condiciones intermedias de 500 K. Los resultados se muestran conjuntamente en la Figura 4.1, manteniendo fija la presión de 1 bar.

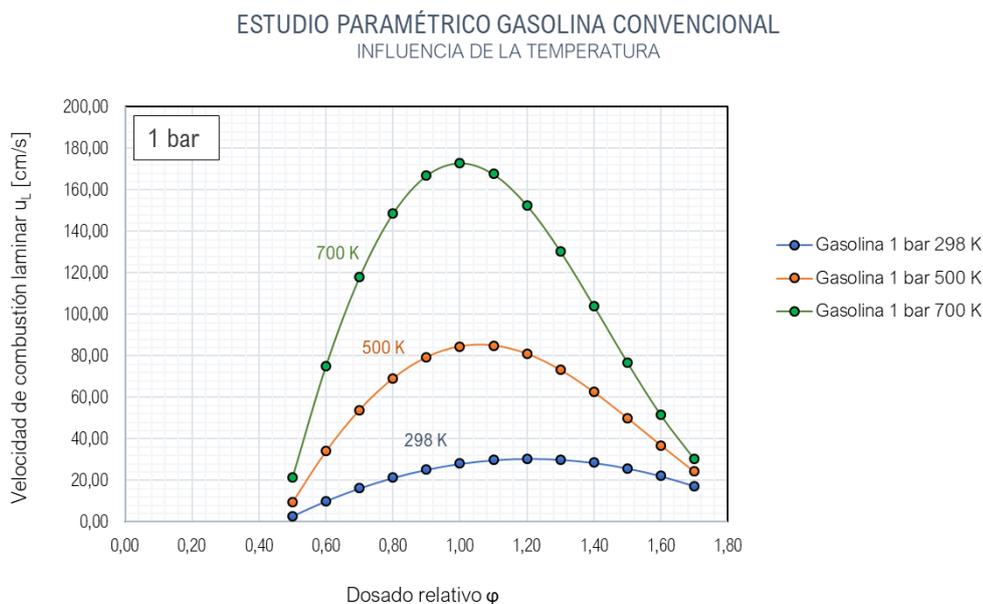


Figura 4.1. Estudio paramétrico Gasolina Convencional: influencia de la temperatura.

Comenzando por el rango de valores de la velocidad de combustión laminar, se puede observar que se encuentra en torno a 30 cm/s para las condiciones de referencia de 298 K y 1 bar. Esto coincide con las primeras investigaciones que se realizaban sobre la gasolina, recogidas en la *Tabla 2.3. Propiedades del hidrógeno frente al metano y la gasolina. Adaptada de [47]*. Además, se alcanzan valores en torno a 80 cm/s para los 500 K y el extremo superior es de 170 cm/s para las condiciones más elevadas del rango, a 700 K.

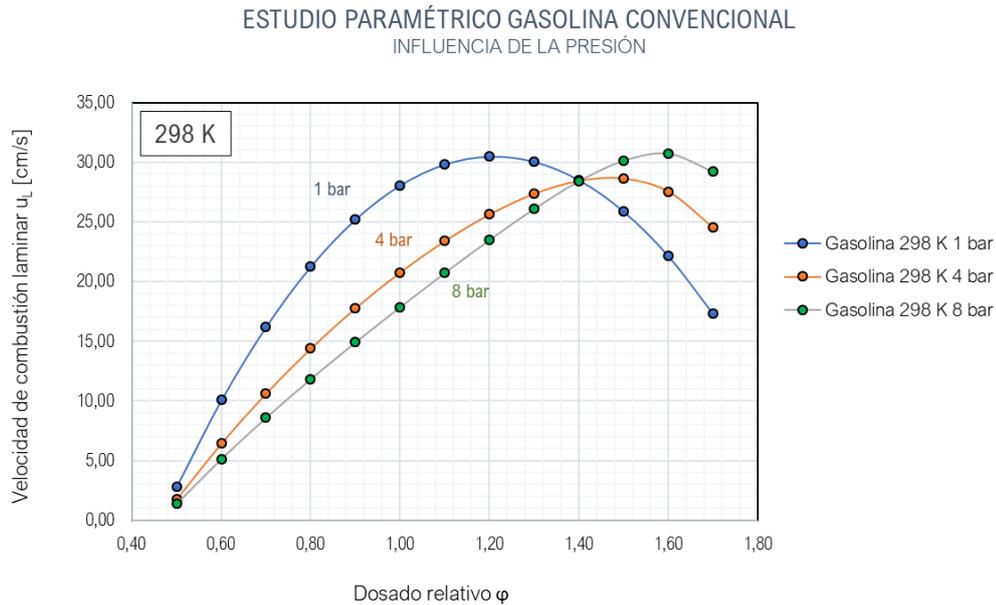
Atendiendo a los dosados, los valores máximos de la velocidad de combustión laminar se dan para un dosado ligeramente superior al estequiométrico para las condiciones de referencia de 298 K, en torno a 1,1. Según aumenta la temperatura, podemos observar que estos valores máximos de la velocidad de combustión laminar se dan para el dosado estequiométrico tanto para 500 K como para 700 K, por lo que se reduce según el aumento de la temperatura.

La pendiente de la curva a partir del dosado de 1,7, sugiere una tendencia a aplanarse de forma asintótica hasta llegar a valores en torno a 0, lo que nos indica que la gasolina puede ser un combustible que puede trabajar a dosados elevados.

Como conclusión a partir de este estudio paramétrico, se puede determinar que el aumento de la temperatura supone un aumento directo de la velocidad de combustión laminar para valores de dosados cercanos al estequiométrico, manteniendo prácticamente invariables los puntos de dosados a los cuales la velocidad es máxima.

Una vez completado el estudio paramétrico de influencia de la temperatura, se obtienen resultados para la presión. Es decir, a una temperatura constante de 298 K, se aumenta la presión gradualmente, siempre dentro del rango de validez del estudio, en este caso entre 1 bar y 8 bares.

En la Figura 4.2, se muestra el comportamiento de la gasolina ante la evolución de la presión. Observando la gráfica, se comprueba que se mantiene constante el rango de valores de la velocidad de combustión laminar en torno a los 30 cm/s para los valores máximos, por lo tanto, el aumento de la presión no supone un incremento de la velocidad de combustión laminar, como sí se producía para la temperatura.



**Figura 4.2.** Estudio paramétrico Gasolina Convencional: influencia de la presión

Incluso puede llegar a ser reducida, como se observa en la curva para la presión de 4 bares, donde se obtienen valores ligeramente inferiores a 30 cm/s. Los valores máximos de la velocidad de combustión laminar se dan para un dosado relativo de 1,2 respecto de las condiciones de referencia de 1 bar, para 1,5 aproximadamente para 4 bares y para 1,6 en el caso de 8 bares.

Como conclusión de este análisis, se puede afirmar que el aumento de la presión supone un aumento directo del dosado relativo para el que se produce la velocidad de combustión laminar máxima. El efecto es mayor en el salto de las condiciones de referencia de 1 bar hacia 4 bares, y se suaviza en el rango de 4 bares a 8 bares; lo que indica que este efecto se va suavizando de manera gradual.

#### 4.1.2. Estudio paramétrico: recirculación de gases de escape

La recirculación de gases de escape, también conocida por sus siglas en inglés ERG (*Exhaust Gas Recirculation*) es un sistema que consiste en reaprovechar los gases de escape de un MCI A en el colector de admisión, con la finalidad de reducir las emisiones de los óxidos de nitrógeno NOx. Comenzó a utilizarse a partir de las restricciones normativas en cuanto a emisiones y contaminación, como se desarrollaba en el epígrafe 1.1. *Introducción*.

Las proporciones relativas de combustible y aire que facilitan un menor consumo de combustible, un funcionamiento suave y fiable, y satisfacen los requisitos de emisiones, al nivel de potencia requerido. Dependerán de la velocidad del motor y de la carga [16].

En la Figura 4.3 se muestra la influencia de la recirculación de los gases de escape en el motor, para una fracción másica de gases de 0,1  $\phi$ /1, tanto a cambios en temperatura como en presión. Se puede apreciar que se reduce sensiblemente la velocidad de combustión laminar en todos los casos, pues el efecto de la dilución de la carga es una reducción de la velocidad de combustión [4].

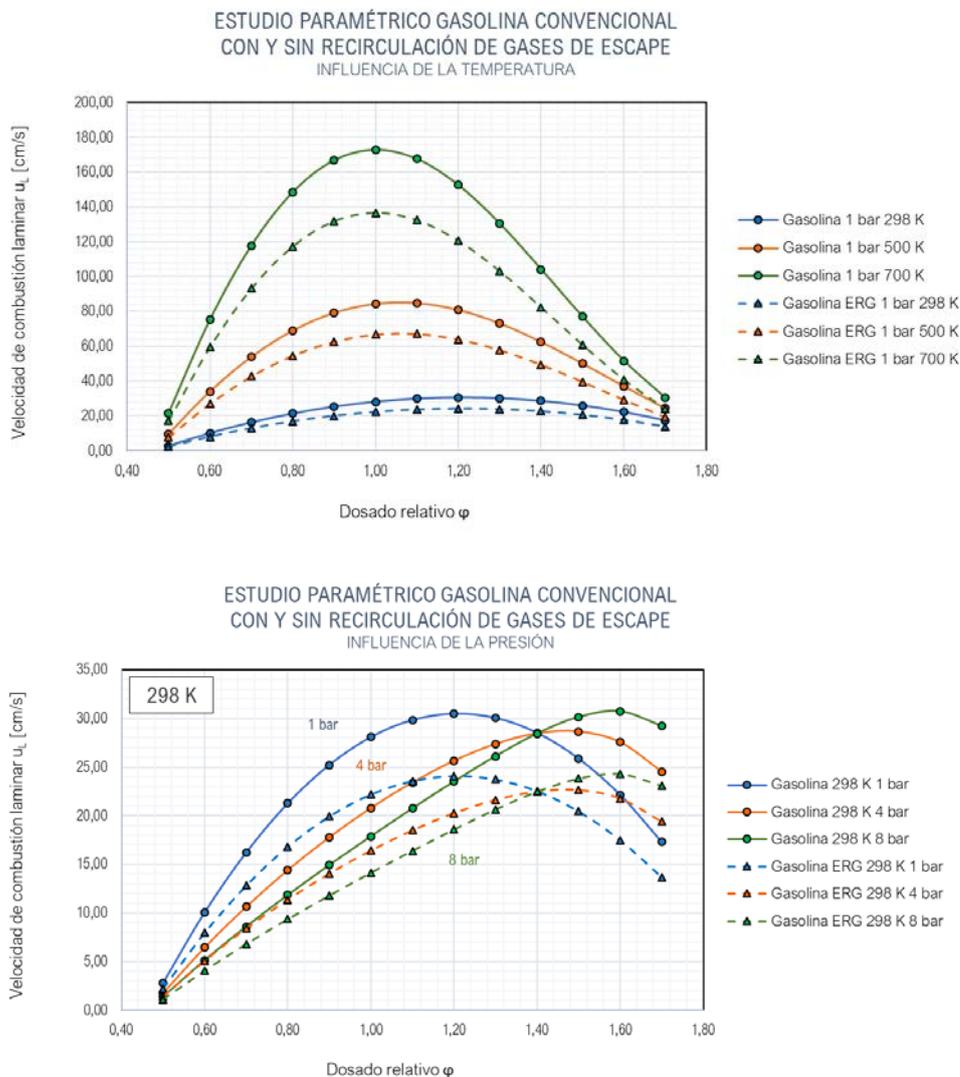


Figura 4.3. Estudio paramétrico Gasolina Convencional: influencia de la recirculación de gases.

## 4.2. PRFs (Primary Reference Fuels): iso-octano, n-heptano y tolueno

Para el caso de los combustibles primarios de referencia (PRFs), se ha decidido estudiar y buscar relaciones para el iso-octano, el n-heptano y el tolueno, debido a su interés de comparación con la gasolina a partir del número de octanos RON, según se exponía en el apartado 2.4.1. *Combustibles tradicionales: gasolina*.

Continuando con la línea de investigación que más se ha tenido en cuenta a lo largo del presente proyecto, la principal fuente experimentación es la de Heywood [4], [16]. Además de contar con expresiones para la gasolina, también relaciona la velocidad de combustión laminar con expresiones para el dosado para los combustibles de referencia. El estudio de los combustibles se podría ampliar a otros ejemplos como el metanol o el propano siguiendo con la investigación de Heywood.

En la Tabla 4.1 se muestran los valores de cálculo para la velocidad de combustión laminar del isoctano, n-Heptano y tolueno, siendo  $F_{r,max}$ ,  $B_{max}$  y  $B_{Fr}$  diferentes parámetros de cálculo de la velocidad en condiciones de referencia  $u_L^0$ .

| Combustible | $F_{r,máx}$ | $B_{max}$ [cm/s] | $B_{Fr}$ [cm/s] |
|-------------|-------------|------------------|-----------------|
| Isoctano    | 1,13        | 26,3             | -84,7           |
| Gasolina    | 1,21        | 30,5             | -54,9           |
| n-Heptano   | 1,10        | 39,0             | -129,6          |
| Tolueno     | 1,10        | 31,0             | -150,1          |

| Combustible | $\alpha$                      | $\beta$                        |
|-------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Isoctano    | $2,18 - 0,8 \cdot (F_r - 1)$  | $-0,16 + 0,22 \cdot (F_r - 1)$ |
| Gasolina    | $2,4 - 0,271F_r^{3,51}$       | $-0,357 + 0,14F_r^{2,77}$      |
| n-Heptano   | $1,89 - 0,55 \cdot (F_r - 1)$ | $-0,23 + 0,01 \cdot (F_r - 1)$ |
| Tolueno     | $1,66 - 3,34 \cdot (F_r - 1)$ | $1,66 - 3,34 \cdot (F_r - 1)$  |

**Tabla 4.1.** Valores para el cálculo de la velocidad de combustión laminar para la gasolina y principales PRFs. *Adaptada de [4].*

Por otro lado, la segunda referencia bibliográfica con la que se ha completado la información acerca del iso-octano, el n-Heptano y el tolueno, ha sido la investigación de Sileghem et al. [53], pues ya realizaba comparaciones de estos combustibles con respecto de la gasolina.

Como se ha mencionado anteriormente para el caso de la gasolina, las experimentaciones de Heywood requieren de una bomba de combustión esférica con ignición central; mientras que los trabajos de Sileghem se apoyan en el método de flujo de calor en un quemador de llama plana.

En el caso de las expresiones de cálculo para el estudio de Sileghem, se han obtenido directamente a partir de los datos de la gráfica, mediante interpolación polinómica, ya que no se desarrollan expresiones definidas. Se cuenta con valores para las condiciones de 298 K y 358 K, para una temperatura de 1 bar.

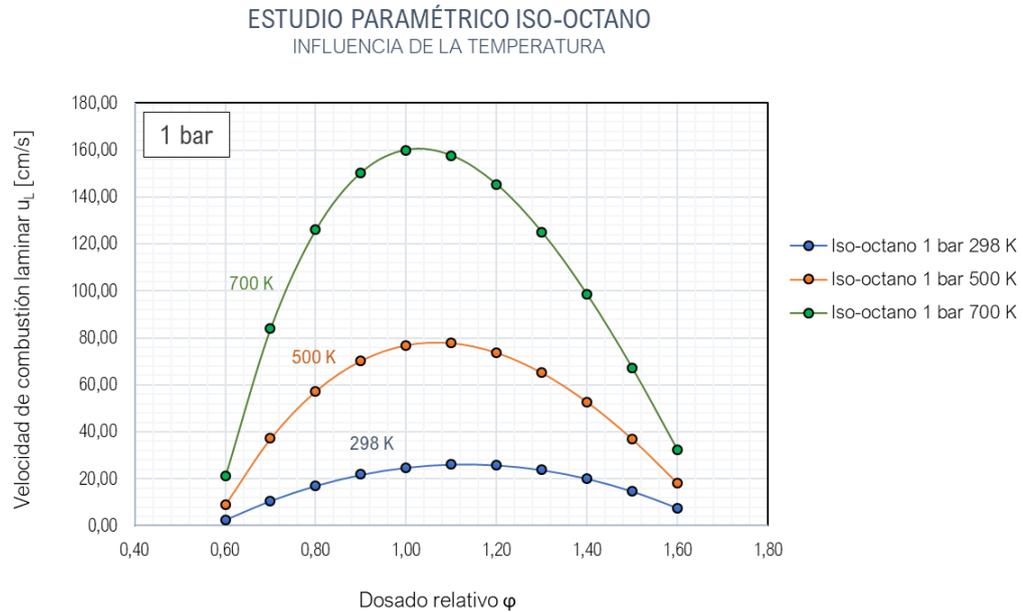
A continuación, se realiza el estudio paramétrico para evaluar la influencia de la temperatura y presión en estos combustibles, de igual modo que se realizaba para la gasolina.

#### 4.2.1. Estudio paramétrico: iso-octano

El iso-octano es el combustible primario más similar a la gasolina, se utiliza ampliamente en las experimentaciones, ya que su número de octanaje o RON es de 100, y puede sustituir a la gasolina con resultados similares.

De nuevo, se realiza un estudio para las condiciones de temperatura de 298 K, 500 K y 700 K, manteniendo constante la presión a 1 bar. A partir del análisis de la gráfica representada en la Figura 4.4, se observa que los valores máximos de velocidad de combustión laminar que se alcanzan para el iso-octano son ligeramente inferiores a los 30 cm/s para las condiciones de referencia de 298 K, y se aumenta a los 80 cm/s para los 500 K, y hasta los 160 cm/s para los 700 K.

Del mismo modo que sucedía para la gasolina, los valores de dosado a los que se producen estos valores máximos pasan de 1,1 para las condiciones de referencia, a reducirse hasta el estequiométrico con los aumentos de temperatura.



**Figura 4.4.** Estudio paramétrico Iso-octano: influencia de la temperatura.

Se obtienen conclusiones comunes a la gasolina, pues el aumento de temperatura implica aumentos en la velocidad de combustión laminar, sin variar prácticamente los dosados, ya que solo se reducen ligeramente.

Por otro lado, también se realiza el estudio paramétrico para observar la influencia con la presión, para los valores de 1 bar, 4 bares y 8 bares, manteniendo los 298 K. Esta gráfica se recoge en la Figura 4.5. Para las distintas presiones, el rango de velocidades de combustión laminar es de 20 cm/s hasta 26 cm/s para el iso-octano, siendo inferior al de la gasolina para las condiciones de referencia.

Con respecto al dosado, de nuevo se obtienen valores máximos para dosados de 1,1 en condiciones de referencia, y de 1,2 tanto para 4 bares como para 8 bares, en 22 y 20 cm/s respectivamente. Con esta información, se puede concluir que para el iso-octano, el aumento de presión no solo supone aumentar ligeramente el dosado relativo para el punto de velocidad de combustión laminar máxima, sino que además se provoca una caída en el valor de la velocidad de combustión laminar.

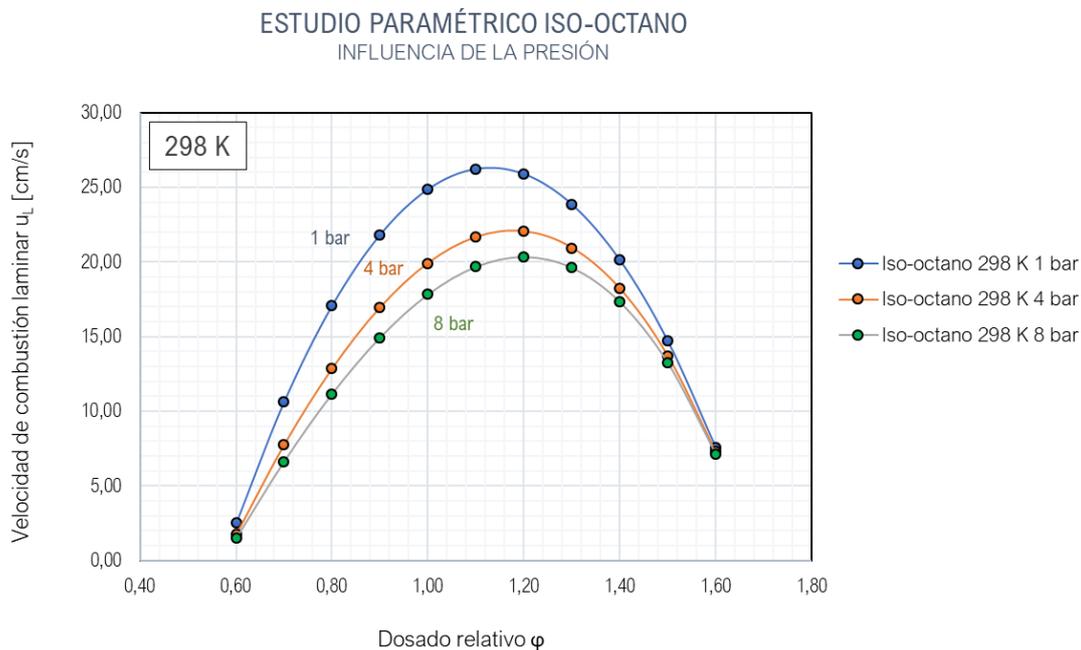


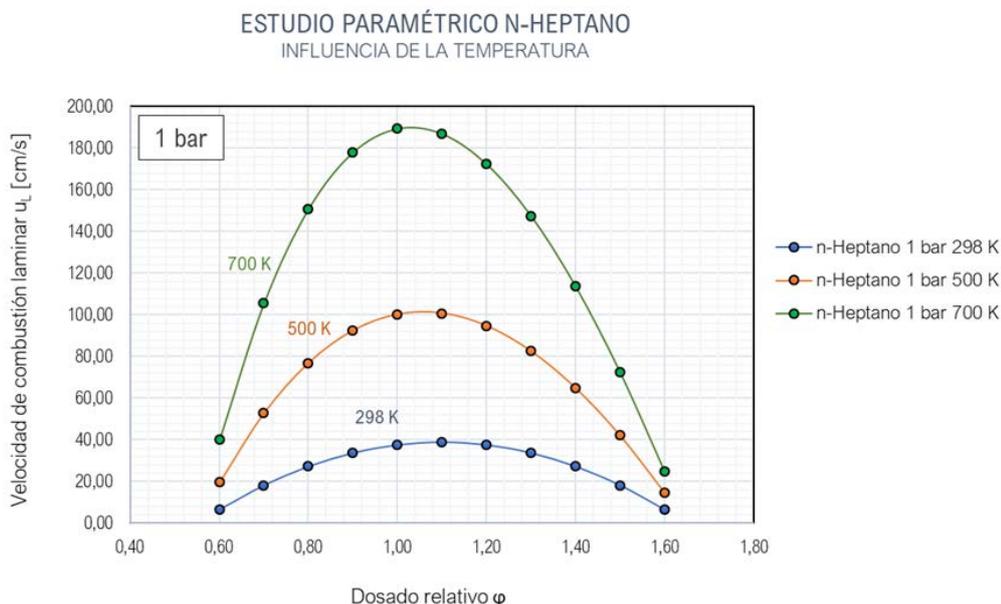
Figura 4.5. Estudio paramétrico Iso-octano: influencia de la presión.

#### 4.2.2. Estudio paramétrico: n-heptano

Para el caso del n-heptano, en el estudio paramétrico se observan mayores valores de los puntos de la velocidad de combustión laminar que para el iso-octano y la gasolina. Se representa en la Figura 4.6. Los rangos de los puntos máximos abarcan desde 40 cm/s para la temperatura de referencia de 298 K, aumenta hasta 100 cm/s para los 500 K, y finalmente se alcanzan en torno a 190 cm/s para los 700 K.

El comportamiento del n-heptano, por lo tanto, es de una combustión más rápida que la gasolina, y con mayor sensibilidad a la temperatura. En referencia a los dosados relativos, la velocidad máxima se mantiene con el mismo comportamiento que el iso-octano, con 1,1 para 298 K y en torno a 1 para temperaturas superiores, es decir, se regresa al dosado estequiométrico.

Como conclusión, se puede afirmar que se mantiene la tendencia que se viene observando con los otros dos combustibles, según la cual la velocidad de combustión es directamente proporcional al aumento de la temperatura.



**Figura 4.6.** Estudio paramétrico n-Heptano: influencia de la temperatura.

En cuanto al estudio paramétrico de influencia de la presión, se continúa con el análisis, graficando el resultado en la Figura 4.7. El comportamiento del n-heptano es más similar al del iso-octano que al de la gasolina con respecto a la influencia de la presión.

En este caso, la velocidad de combustión laminar disminuye desde los 40 cm/s para la condición de referencia de 1 bar, hasta los 29 cm/s para los 4 bares, y en torno a 25 cm/s para 8 bares. Los puntos máximos de las curvas, para los cuales la velocidad de la combustión es máxima, se mantienen en dosados superiores al estequiométrico, en una relación de 1,1, sin sufrir alteraciones.

Como conclusión para el n-heptano, la influencia de aumentar la presión incide con mayor sensibilidad en la reducción de la velocidad de combustión laminar, pero no influye tanto en el dosado, creando combustiones más lentas para las mismas relaciones de aire y combustible.

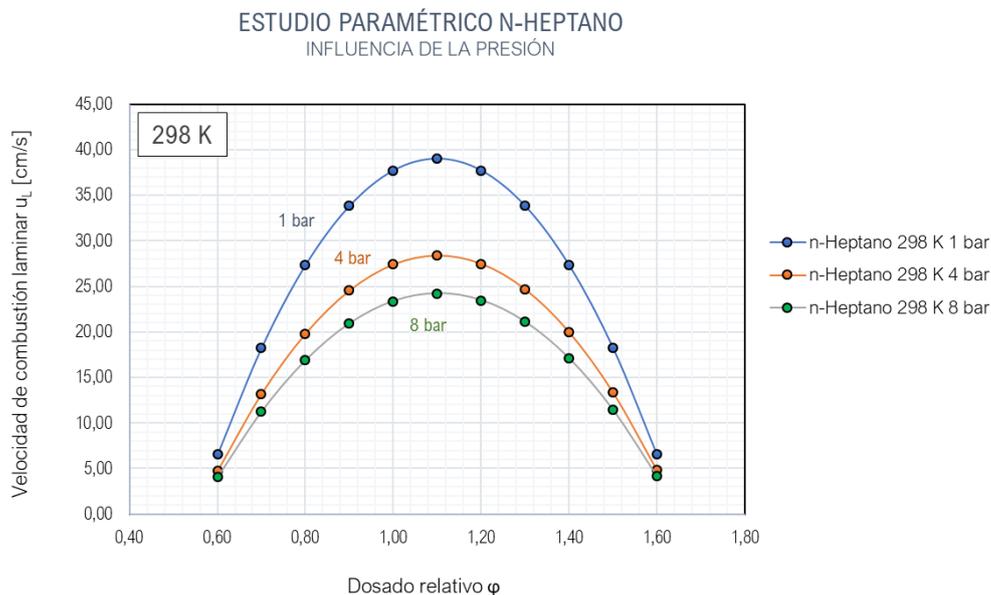


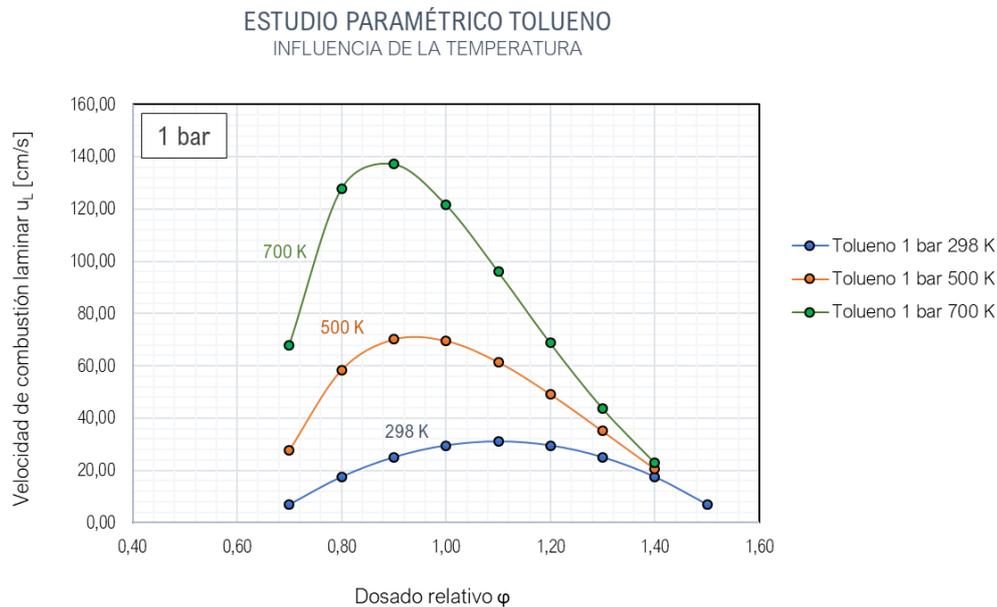
Figura 4.7. Estudio paramétrico n-Heptano: influencia de la presión.

### 4.2.3. Estudio paramétrico: tolueno

El tolueno es el combustible de referencia que presenta mayor diferencia con respecto al iso-octano y el n-heptano. De hecho, resulta complementario a los dos primeros, ya que las mezclas de iso-octano, n-heptano y tolueno se conocen como multicomponentes o combustibles ternarios de referencia TRFs, según se desarrollaba en el epígrafe 2.4.1. *Combustibles tradicionales: gasolina*.

A partir de los resultados obtenidos en la gráfica de la Figura 4.8, se puede observar que el valor de la velocidad de combustión laminar se mantiene en 30 cm/s para los 298 K, similar a la gasolina. Para los 500 K aumenta hasta 70 cm/s, y hasta casi 140 cm/s para 700 K.

El comportamiento es inverso al que se ha estado evaluando con respecto al dosado, disminuyendo el dosado relativo para el cual se produce la mayor velocidad de combustión laminar. A partir del valor 1,4, además la velocidad de combustión se vuelve negativa en la experimentación, por lo que estos datos se descartan. Este efecto no se producía en la gasolina, por lo que el tolueno es un combustible que no podrá trabajar a altos dosados.



**Figura 4.8.** Estudio paramétrico Tolueno: influencia de la temperatura.

En conclusión, el aumento de la temperatura continúa suponiendo un aumento de la velocidad de combustión laminar para el tolueno, y a su vez una disminución del valor de dosado relativo para estos valores máximos.

El comportamiento respecto a la presión, que se recoge en la Figura 4.9, también resulta diferente, pues se aprecian pocas variaciones entre las gráficas de las distintas temperaturas.

El valor de la velocidad de combustión laminar disminuye apenas en función de los aumentos de presión, pasando por valores de 30 cm/s para las condiciones de referencia, hasta 29 cm/s para 4 bares y se pueden leer 28 cm/s para los 8 bares. Se repite el efecto de aumentar los dosados a los que se producen estos valores máximos, pero con ligeros incrementos a partir del valor 1,1.

De nuevo, el aumento de la presión supone un aumento de los dosados y una disminución en la velocidad de combustión laminar. Aunque para el caso del tolueno estas diferencias son muy sutiles, se puede afirmar que no se aprecia una gran influencia.

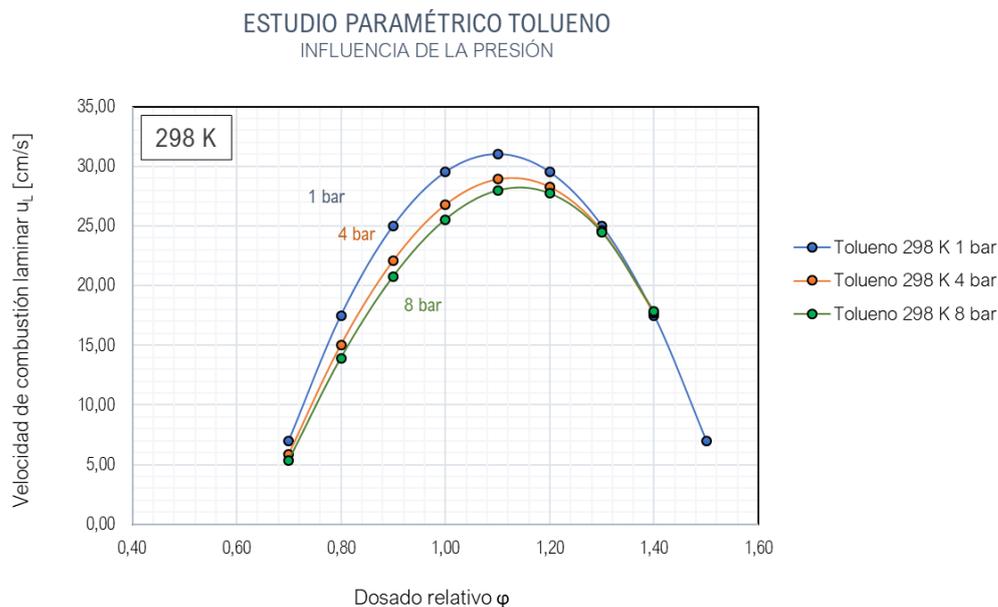


Figura 4.9. Estudio paramétrico Tolueno: influencia de la presión.

### 4.3. Gas natural: metano

El gas natural es uno de los combustibles alternativos con mayor línea de investigación como sustituto de la gasolina en los MCIA, siendo en la mayor parte de su composición metano. Por este motivo, se ha realizado una amplia búsqueda bibliográfica, como en el caso de la gasolina.

La primera referencia que se ha añadido a la herramienta es una publicación realizada en la misma Universidad de Valladolid, por investigadores del Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica: Miriam Reyes, tutora del presente Trabajo Fin de Máster, F.V. Tinaut, A. Hornillo y A. Lafuente [11]. En esta investigación, se caracterizan velocidades de combustión laminar de mezclas de metano-aire e hidrógeno-aire.

La metodología experimental que se ha utilizado en esta publicación es una instalación de una bomba de combustión esférica a volumen constante, clasificada según el método de llamas que se propagan libremente. La medida de la presión

se va registrando gracias a unos transductores piezoeléctricos, según la instalación que se ha descrito en el apartado 2.3.4. *Metodologías experimentales para su medida*. Se consiguen expresiones que relacionan directamente la velocidad de combustión laminar el metano con los dosados, a partir de correlaciones de Metghalchi y Keck [31], para un rango de validez de 1 a 7 bares, y de 300 K a 480 K.

La segunda referencia que se ha añadido como investigación del metano, son los trabajos de S. Bougrine et al. [55], que realizó además numerosos estudios acerca del comportamiento del metano en combinación con hidrógeno [56]. En estado caso, se utiliza un modelo numérico para la obtención de los resultados, concretamente el modelo de combustión CFM1D, que permite evaluar las reacciones químicas de oxidación que se producen en el frente de llama.

Este modelo presenta una serie de hipótesis para validarlo, entre ellas:

- Se asume la mezcla de 12 especies diferentes considerados como gas ideal, entre combustible,  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $NO$ , e hidrocarburos sin quemar (UHC, O, H, OH).
- La composición de la mezcla se considera homogénea en cada zona (gases frescos y quemados).
- Se supone presión idéntica en ambas zonas.
- Cada zona se describe por su masa, volumen, composición y temperatura.
- Se supone que el campo de energía cinética turbulenta es uniforme en el cilindro.

Gracias a este modelo numérico, se permite ampliar las condiciones que se obtienen en el laboratorio, alcanzando un rango de validez de 1 bar hasta los 110 bares, y desde los 0 K hasta los 950 K en temperaturas. Se consiguen expresiones que relacionan la velocidad de combustión laminar con el dosado, a partir de las correlaciones de Metghalchi y Keck [31], con mayor número de parámetros de cálculo.

Las siguientes referencias evaluadas y a añadidas a la base de datos son las de las investigaciones de Bosschaart y De Goey [57], el metano evaluado por Dirrenberger et. al [58] y por último las de Tahtouh et. al [59].

Para el caso del metano de Goey, se utiliza una metodología de flujo de calor en un quemador de placas perforadas, que pertenece a la clasificación de llamas estacionarias. También se ha obtenido la correlación principal a partir de interpolación polinómica de las gráficas del artículo, al no contar con una expresión desarrollada. Se cuenta con un rango de validez de 0,6 a 1,6 para los dosados relativos, y de 293 K hasta 353 K para la temperatura.

En el caso del metano de las investigaciones de Dirrenberger, también se utiliza el método de flujo de calor en un quemador de llama plana. la correlación que se utiliza no es la de Metghalchi y Keck, sino una relación aportada por Ömer L. Gülder [60], que aparece recogida en la Ficha correspondiente. Se tienen rangos de dosado desde 0,7 hasta 1,7, para una única temperatura de 300 K.

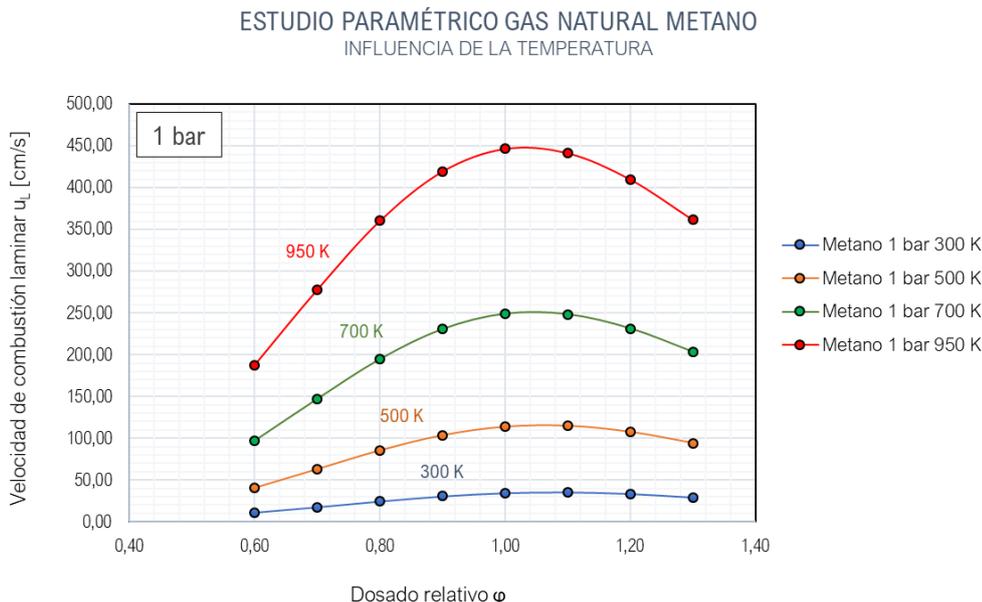
Por último, el metano de los estudios de Tahtouh, regresa a la utilización de la bomba de combustión cilíndrica a volumen constante, al igual que la metodología del laboratorio de la Universidad. El análisis numérico se basa en el fundamento de la longitud de Markstein, que se describía en el apartado 2.3.2. *Expresiones de cálculo y tasa de stretch*.

Sin embargo, como se no encuentra una relación directa entre dosado y velocidad de combustión laminar, la expresión utilizada para graficar se calcula a partir de una interpolación polinómica. Se tienen rangos de dosado relativo desde 0,55 hasta 1,3, de nuevo para una única temperatura de 300 K.

A continuación se añade el estudio paramétrico realizado para el metano, escogiendo como combustible de referencia la investigación de Bougrine et. al, por ser la de mayor rango de aplicación.

#### 4.3.1. Estudio paramétrico

Para el caso del metano, lo primero que se observa es que la gráfica, Figura 4.11, para las condiciones de referencia es más plana que la de los demás combustibles, sin embargo esto solo es efecto de que se ha podido analizar temperaturas superiores, hasta 950K, donde los valores de la velocidad de combustión laminar son muy superiores.



**Figura 4.10.** Estudio paramétrico Metano: influencia de la temperatura.

El metano se comporta de forma bastante similar a la gasolina, en cuanto a la forma de las gráficas, sin embargo, puede alcanzar velocidades de combustión muy superiores. En condiciones de referencia, a 300 K, se obtienen 35 cm/s. Para 500 K, se pueden leer 115 cm/s, continuando con 250 cm/s para 700 K y por último el valor superior que se obtiene es de 450 cm/s para 950K.

Respecto a los dosados, se mantiene el valor máximo de las gráficas en el dosado estequiométrico, sin sufrir alteraciones. En conclusión, el aumento de la temperatura supone, de nuevo, un aumento en la velocidad de combustión laminar del metano, de manera mucho más pronunciada, y sin variaciones en los dosados.

En el caso del estudio para las variaciones en la presión, que se adjunta en la Figura 4.11, se podría decir que el efecto de aumentar la presión es prácticamente opuesto al de aumentar la temperatura, ya que se observa mucha simetría respecto de las gráficas, pero causando un efecto contrario. Los valores máximos de velocidad de combustión van disminuyendo desde 35 cm/s para 1 bar en condiciones de referencia, pasando por 23 cm/s para 3 bares, 15 cm/s para 8 bares, y finalmente el valor está en torno a 5 cm/s para el valor más extremo de 90 bares.

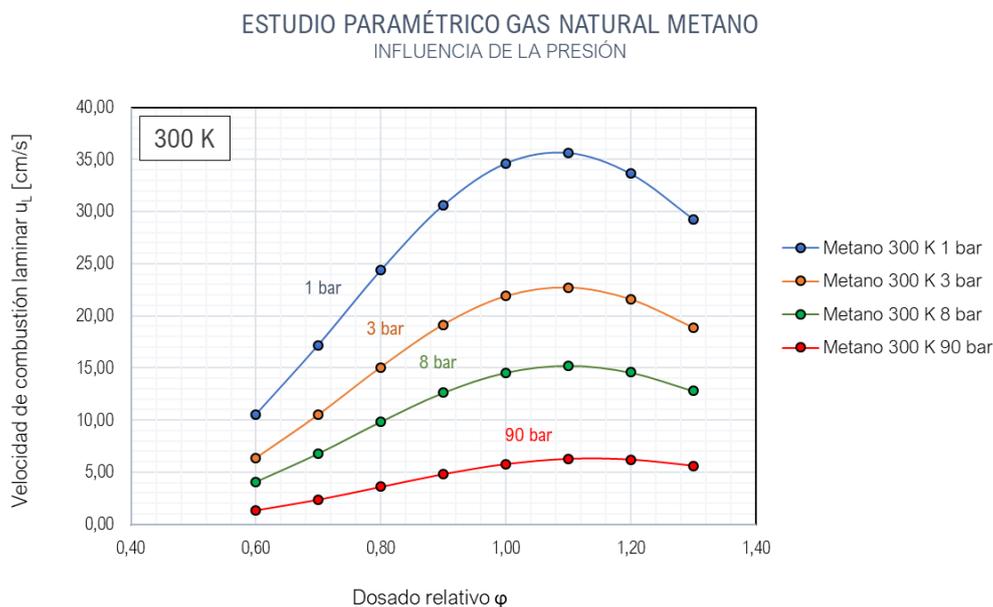


Figura 4.11. Estudio paramétrico Metano: influencia de la presión.

## 4.4. Hidrógeno

El hidrógeno es la fuente de energía más prometedora en todas las investigaciones acerca de combustibles alternativos para el futuro de los MCIAs, y para el que se van a obtener valores más altos de la velocidad de combustión laminar, debido a la difusión mucho más rápida del hidrógeno dentro de la llama.

Una mayor parte de las investigaciones del hidrógeno, lo contemplan en combinación o mezcla junto con el metano, ya que el hidrógeno aún es difícil de obtener en grandes cantidades por la industria, debido a su naturaleza y a su almacenamiento. Por ejemplo, se han citado las investigaciones de Bougrine en mezclas de metano e hidrógeno [56], además de otras en la propia Universidad de Valladolid por el investigador Álvaro Lafuente [21], consultado en numerosas ocasiones durante la realización del presente Proyecto.

Sin embargo, en el alcance de la aplicación se definía incluir únicamente artículos con resultados para cada combustible de manera individualizada, contemplando

que otros resultados o mezclas podrían ampliarse de cara a futuros desarrollos. Es por eso que se han buscado y añadido como base de datos diferentes investigadores acerca del hidrógeno.

En concreto, las investigaciones más representativas encontradas han sido las del investigador Verhelst et. al [61], con numerosos artículos acerca del hidrógeno. En concreto, en el artículo presentado se utiliza una metodología también numérica, conocida como esquema de reacción de Konnov. De nuevo, se basa en la evaluación de las reacciones químicas de oxidación que se producen en el frente de llama. Se plantean hipótesis similares a las que planteaba Bougrine para el metano, pues son comunes de estas metodologías.

Mediante este método, se obtienen resultados válidos en un rango de dosado relativo de 0,33 a 5, para presiones entre 5 y 45 bares y para temperaturas desde los 500 K hasta los 900 K. De nuevo, se basa en las correlaciones de Metghalchi y Keck [31], extrayendo un gran número de parámetros que definen la velocidad de combustión laminar en condiciones de referencia, y que se recogen en la Ficha correspondiente.

Los siguientes artículos seleccionados, son las investigaciones de Iijima y Takeno [51], y de Gerke et. al [62]. Para obtener los resultados, Iijima y Takeno utilizan una bomba esférica a volumen constante, y consiguen a partir de sus estudios una correlación propia, nombrada como Iijima y Takeno. Consiguen rangos de validez desde 0,5 hasta 4 para valores de dosado, presiones desde los 0,5 bares hasta los 25 bares, y temperaturas desde 291 K hasta 500 K.

Por otro lado, las investigaciones de Gerke se basan en una metodología experimental que utiliza una máquina de compresión de un solo cilindro, que examina esféricamente las condiciones de las llamas en expansión, a partir del avance único de un pistón en movimiento. Mediante este método consigue rangos de dosado de 0,4 hasta 2,5, presiones desde los 10 bares hasta los 45 bares y temperaturas entre 350 K y 700 K. Se utilizan las correlaciones de Metghalchi y Keck [31].

Finalmente, se muestra el estudio paramétrico realizado para el hidrógeno, observando las variaciones de temperatura y presión. Se ha seleccionado el hidrógeno de Verhelst, por ser uno de los más representativos en el campo.

### 4.4.1. Estudio paramétrico

En la gráfica de la Figura 4.12, se agrupan las gráficas correspondientes al estudio paramétrico de la temperatura para el hidrógeno.

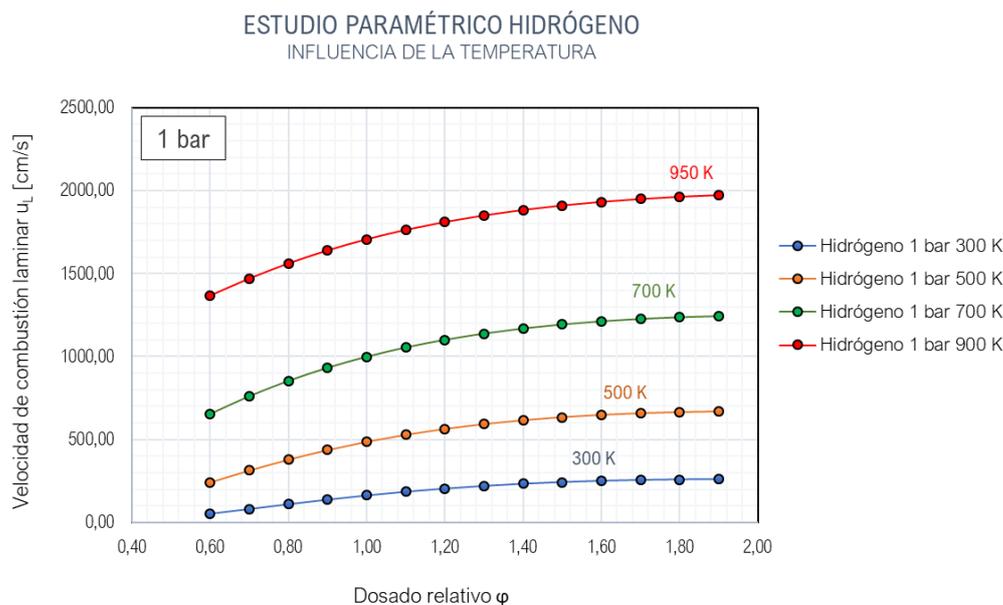


Figura 4.12. Estudio paramétrico Hidrógeno: influencia de la temperatura.

La principal diferencia que se observa para el hidrógeno es que las curvas de velocidad frente al dosado son mucho más planas, los valores son más estables a lo largo de los diferentes dosados, y la combustión es posible para valores más elevados, ya que no se alcanza el 0 en la velocidad hasta después de superar un dosado relativo alto, de manera prácticamente asintótica. Por lo tanto, el hidrógeno es un combustible que puede trabajar a altos valores de relación con el aire.

La otra gran diferencia que resalta de las gráficas son los elevados valores que se alcanzan para la velocidad de combustión, respecto a los demás combustibles analizados. Comparando los resultados con los del metano, son valores tres veces mayores. Para el caso de las condiciones de referencia de 300 K, se alcanzan valores de 260 cm/s, aumentando hasta 670 cm/s para 500 K, 1240 cm/s para 700 K, y por último el valor máximo en el rango disponible de 950 K es de 2000 cm/s.

Al igual que para la gasolina y el metano, los dosados para estos valores de pico se mantienen estables en un valor de 1,8 aproximadamente. Como conclusión, además de las grandes ventajas del hidrógeno como combustible que se pueden observar solamente a partir de este estudio paramétrico, se puede concluir que la temperatura aumenta de forma muy pronunciada las velocidad de combustión laminar en el caso del hidrógeno.

El estudio paramétrico para la presión se ha añadido en la Figura 4.13.

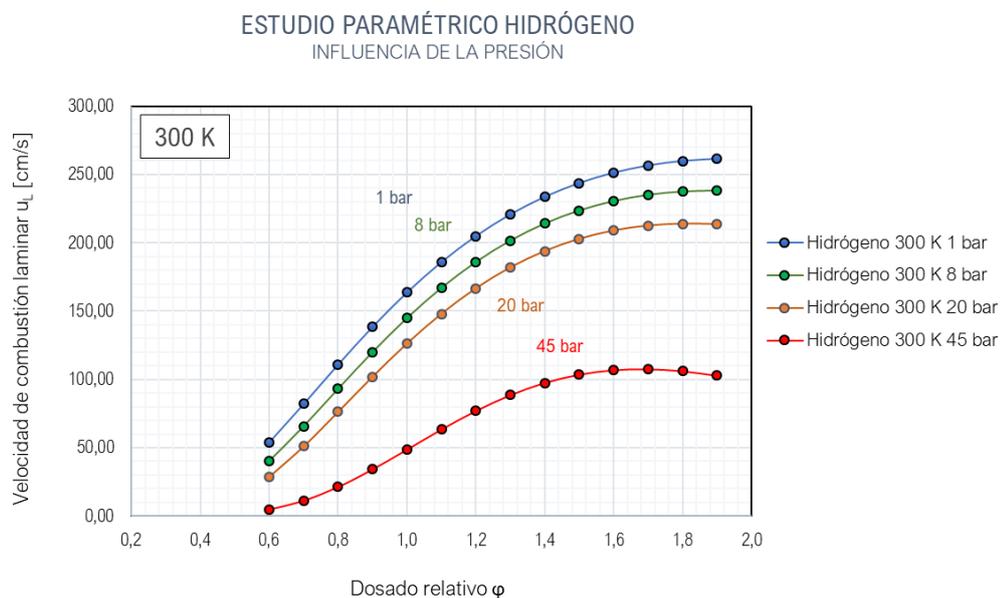


Figura 4.13. Estudio paramétrico Hidrógeno: influencia de la presión.

Para el caso de la influencia de la presión, sucede el mismo fenómeno que se comentaba para el metano, pues existe un efecto completamente opuesto a la temperatura. Se presenta mayor variación de la velocidad a lo largo del rango de dosados, ya que las gráficas ya no son tan aplanadas y se encuentra un pico más marcado. Es coherente que el metano y el hidrógeno presenten comportamientos similares en la forma de las gráficas, ya que ambos se encuentran en estado gaseoso.

Los valores de velocidad de combustión van disminuyendo desde los 260 cm/s para los 8 bares, 160 cm/s para los 20 bares, y por último aproximadamente 100 cm/s para 45 bares. Los valores máximos de velocidad son para dosados un poco menores a medida que se aumenta la presión, comenzando por un dosado de 1,9

hasta un dosado de 1,7. Este efecto es contrario a lo que sucedía para el resto de los combustibles.

En conclusión, un aumento de la presión supone fuertes disminuciones de la velocidad de combustión laminar, e incluso una ligera reducción del dosado al que se produce el valor máximo.

## 4.5. Estudios comparativos entre combustibles

A continuación, para concluir con este Capítulo de resultados obtenidos a partir de la aplicación diseñada en Excel y VBA, se recogen las principales comparaciones que se pueden realizar entre combustibles, añadiendo también las principales mezclas de interés a partir de los resultados individuales.

Se comenzará desarrollando una comparación entre la gasolina y los combustibles primarios de referencia PRFs que se han estudiado: iso-octano, n-heptano, y tolueno. A la mezcla de ellos, se le denomina combustible terciario de referencia TRF.

Seguidamente, se realiza una comparación entre la gasolina y el metano como combustible alternativo para los MCIA. Finalmente, se realizan comparaciones con mezclas de metano e hidrógeno, para observar la influencia de este combustible y justificar la importancia de la investigación en este campo.

### 4.5.1. Gasolina y combustibles primarios de referencia PRFs

En la Figura 4.14, se adjunta el estudio comparativo para la temperatura donde aparecen representados conjuntamente la gasolina, el iso-octano, el n-heptano y el tolueno. Además, se ha añadido una mezcla de estos combustibles de referencia, basada en las investigaciones de Kalghatgi et. al [63] en la Universidad de Oxford, que trabaja sobre un método de cálculo para obtener el RON de estas mezclas.

Se ha escogido una mezcla basada en un 64% en vol. de iso-octano, 16% de n-heptano y 20% en tolueno. Esta mezcla se correspondería con un valor RON de 89,1, según el artículo, aunque sufriría variaciones en función de las condiciones.

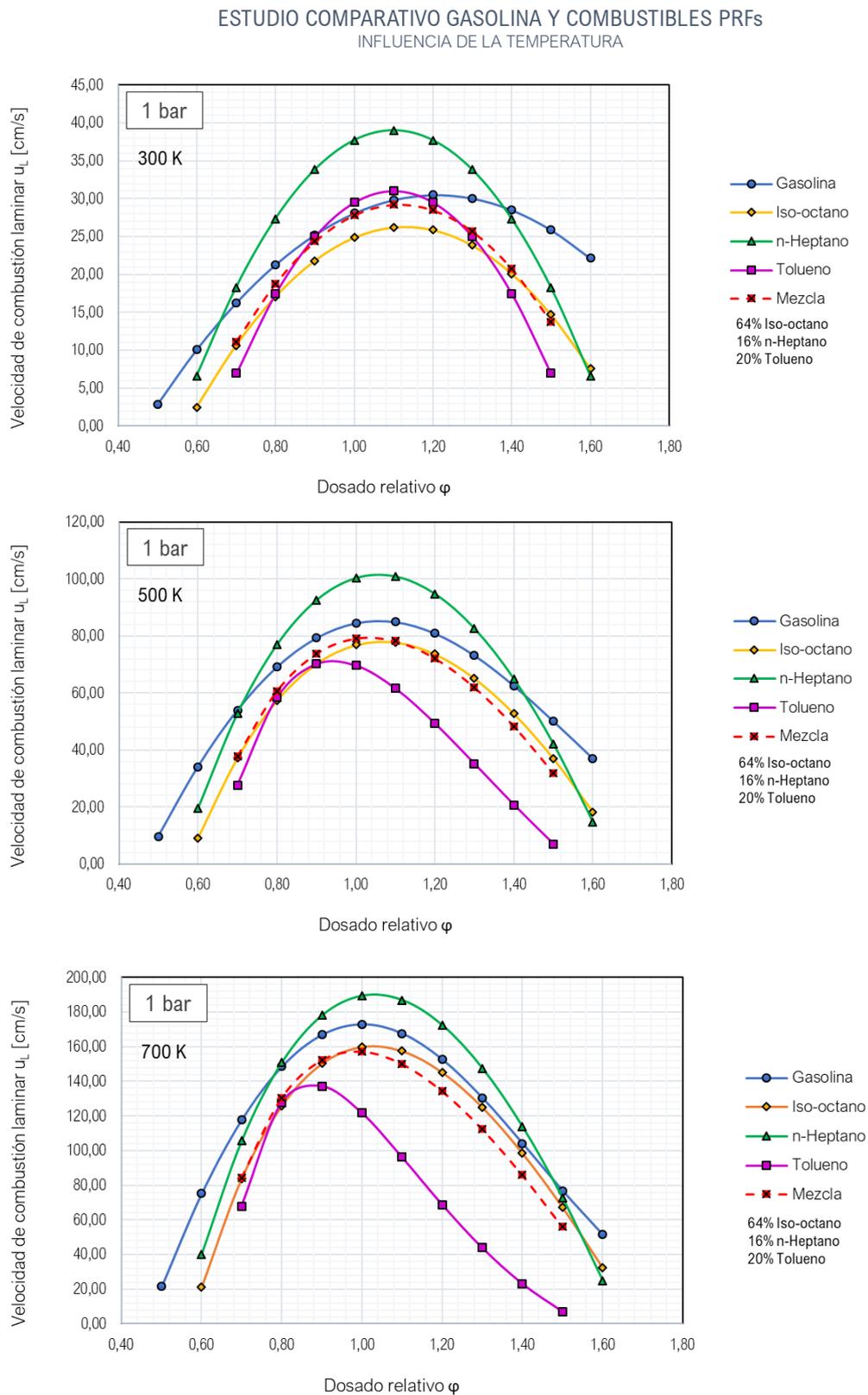


Figura 4.14. Estudio comparativo gasolina y combustibles PRFs. Influencia de la temperatura.

A partir de este estudio, se comprueban las indicaciones que ya se realizaron en torno a la gasolina y estos combustibles. El iso-octano es el más similar al comportamiento de la gasolina a todas las temperaturas estudiadas, siendo el heptano el combustible con mayores valores de velocidad de combustión laminar aunque también presenta un comportamiento similar en la forma de la gráfica. Por el contrario, el tolueno, es el más débil para altos valores de dosado en función aumenta la temperatura, y presenta un valle con mayor rapidez que el resto.

El efecto que se puede observar en la mezcla es una combinación de todas estas propiedades individuales, siendo en el caso de las condiciones de referencia muy similar a la gasolina, incluso alcanza el mismo valor para los dosados estequiométrico y superior en 1,1, donde se alcanzan los 30 cm/s. Queda comprobado, por lo tanto, la importancia de estos combustibles para la sustitución de la gasolina en experimentaciones de laboratorio, pues realmente pueden predecir su comportamiento, y presentan menores variaciones.

Por otro lado, se realiza el estudio paramétrico de influencia de la presión para esta misma comparación de combustibles. Se representan todas las gráficas en la Figura 4.15.

Con respecto a la presión, el comportamiento de la gasolina es bastante más diferente al de los combustibles de referencia. La gasolina puede abarcar mayores rangos de dosado, por lo que la curva tiene tendencia más plana que el resto. Sin embargo, si que se mantienen condiciones muy similares para los dosados cercanos al estequiométrico, que serán las condiciones normales de funcionamiento.

Este efecto se incrementa a medida que se aumenta la presión, desde 1 bar hasta los 8 bares, pues el valor máximo de la velocidad de combustión laminar para la gasolina se dispara hasta un dosado de 1,6 mientras que el resto de los combustibles mantienen valores máximos cercanos a 1,2.

Como conclusión de esta comparación, se puede afirmar que el efecto de la influencia de la presión es mayor para la gasolina, estirando la curva, mientras que el resto de los combustibles mantienen formas similares a las originales.

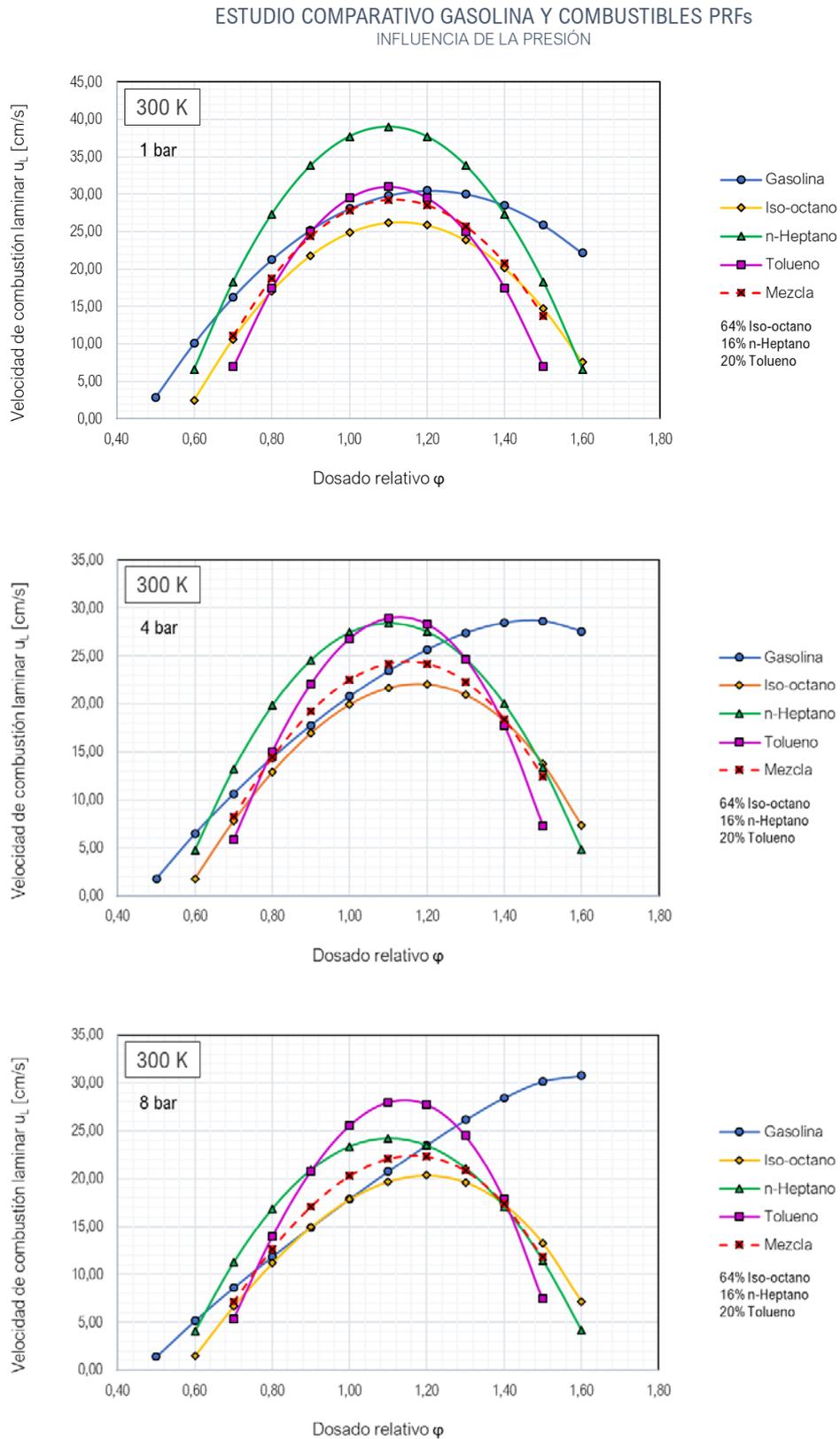


Figura 4.15. Estudio comparativo gasolina y combustibles PRFs. Influencia de la presión.

### 4.5.2. Gasolina y metano

El estudio comparativo entre la gasolina y el metano se muestra en la Figura 4.16 para el estudio de la influencia con la temperatura, y en la Figura 4.17 para las variaciones en la presión.

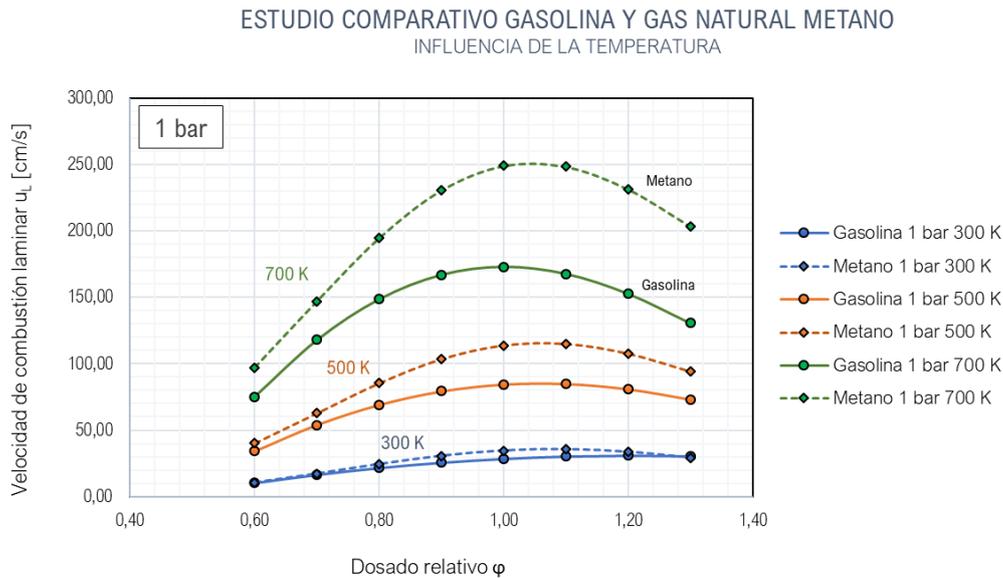


Figura 4.16. Estudio comparativo gasolina y metano. Influencia de la temperatura.

A partir del estudio con respecto de la temperatura, se reafirma la idea que se venía observando al estudiar estos combustibles por separado, y que el metano tiene un comportamiento muy similar para la gasolina, pero aumentando los valores alcanzados de velocidad de combustión laminar desde las condiciones de referencia, y de manera mucho más sensible y notable para los aumentos de temperatura. Se podrían alcanzar hasta los 250 cm/s para los 700 K en lugar de los 170 cm/s que presenta la gasolina.

A partir del estudio de presión, observamos que se mantiene este comportamiento similar, sin embargo para el metano no se alcanzan valores tan elevados del dosado como con respecto a la gasolina según aumenta la presión.

En conclusión, el metano es uno de los grandes combustibles alternativos que se investigan actualmente como sustituto en los MCI, pues permitiría combustiones más rápidas y reduciendo la carga contaminante.

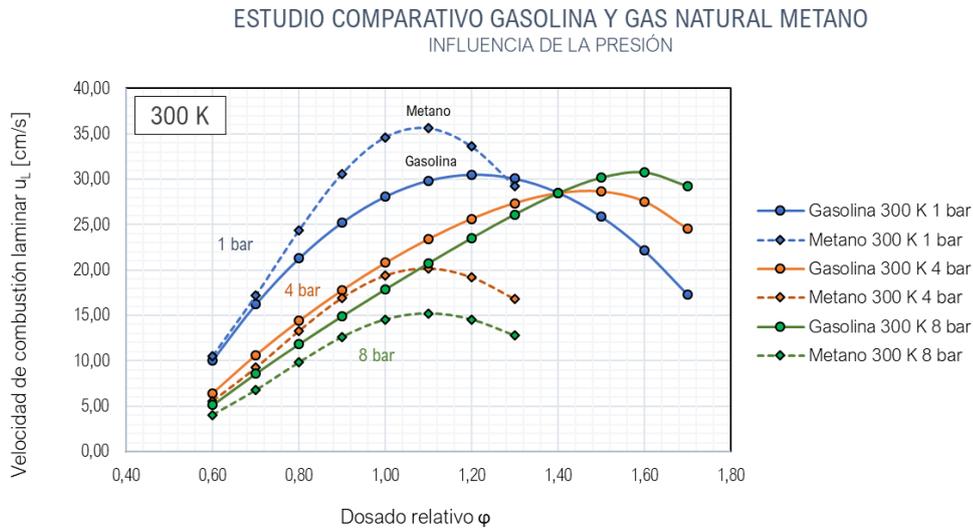


Figura 4.17. Estudio comparativo gasolina y metano. Influencia de la presión.

### 4.5.3. Gasolina y metano con mezcla de hidrógeno

A partir de los estudios comparativos representados en la Figura 4.18 para la temperatura, y la Figura 4.19 para la presión, se puede reafirmar por fin la indudable importancia del hidrógeno como combustible a explotar y explotar.

Según se aumenta la cantidad de hidrógeno en mezcla con el metano, desde un 10% hasta un 70% en vol., se puede observar un aumento radical de la velocidad de combustión laminar con el crecimiento de la temperatura, superando con creces las condiciones de la gasolina. Para una mezcla de metano con un 20% de hidrógeno se duplica la velocidad obtenida para la gasolina, para los 300 K.

Los efectos son completamente similares para el caso de los aumentos de presión, donde el hidrógeno como combustible único puede alcanzar los 250 cm/s para 1 bar frente a los valores en torno a 30 cm/s para la gasolina.

Con esta comparación, queda más que justificada la importancia del hidrógeno como combustible del futuro, aunque inicialmente se añada en mezclas con el gas natural metano para facilitar su transporte, distribución, y tecnología.

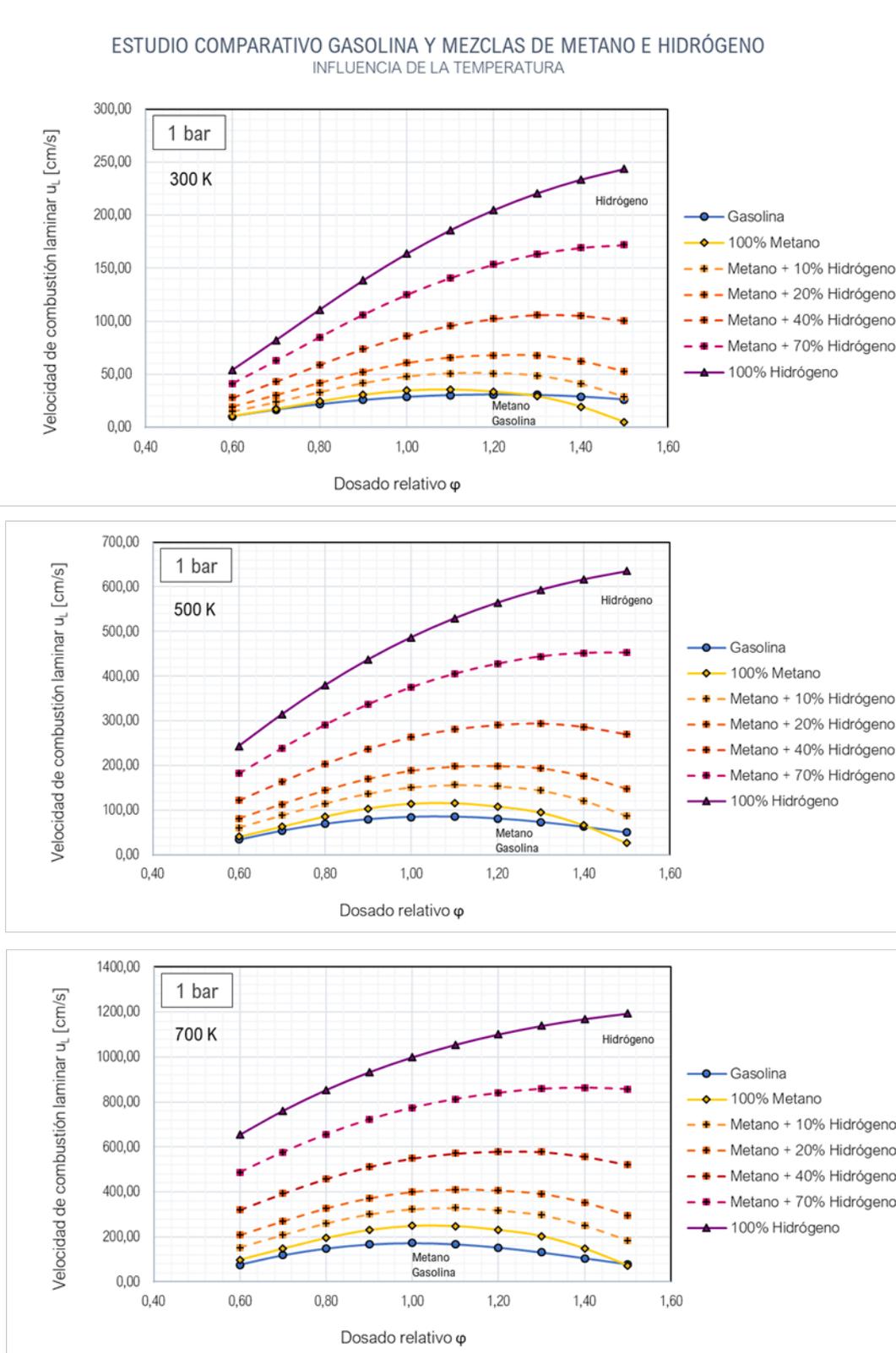


Figura 4.18. Estudio comparativo gasolina y mezclas de metano e hidrógeno. Influencia de la temperatura.





# Capítulo 5:

## Conclusiones y líneas futuras

### 5.1. Conclusiones

#### 5.1.1. Conclusiones generales

El aporte principal que se obtiene de la realización de este Trabajo Fin de Máster es cumplir con la motivación personal de investigación en el campo de los MCLA, promovida por una inquietud ante el crecimiento de las necesidades de transporte, y la repercusión directa que ejerce sobre el medio ambiente y la contaminación global. Además, ha resultado completamente enriquecedor el trabajo realizado en el Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica, accediendo a sus trabajos e investigaciones previas.

Por ello, las conclusiones generales de la realización del presente TFM son las siguientes:

- Se ha realizado un estudio teórico completo sobre los parámetros que afectan a la combustión, los diferentes métodos para medirlos y experimentar de cara al laboratorio, y qué combustibles pueden aportar soluciones reales de cara al futuro.
- Por otro lado, se ha cumplido con un objetivo de gran valor personal y profesional, que es el de desarrollar actitudes organizativas y de recopilación, trabajando con un gran número de artículos y fuentes de investigación, mediante una aplicación avanzada de la herramienta Microsoft Excel, que cuenta con tanta importancia y practicidad de cara a la vida laboral. La oportunidad de desarrollar un proyecto utilizando la herramienta VBA sin duda es de un gran valor académico.
- A raíz de estas capacidades de organización y de utilización de la herramienta Excel completa, se ha cumplido con el objetivo principal y la

motivación de desarrollo de este proyecto, creando una herramienta dual que contenga a la vez una base de datos completa del campo de investigación y una opción de buscador. Con una interfaz sencilla e intuitiva, y amplia capacidad de adaptación y cambio con futuras implementaciones adaptadas a las necesidades reales.

- La herramienta desarrollada ha sido probada y utilizada para realizar un estudio paramétrico de las velocidades de combustión de los combustibles utilizados (gasolina, iso-octano, n-heptano, tolueno, metano, hidrógeno y sus mezclas) en función de dosado, temperatura y presión. Además, se han realizado comparaciones entre los diferentes combustibles para distintas condiciones de presión y temperatura.

### 5.1.2. Conclusiones específicas

Como conclusiones más específicas y derivadas de las anteriores conclusiones generales, merece la pena destacar las siguientes:

- La herramienta que se ha desarrollado permitirá a futuros investigadores ampliar esta recopilación bibliográfica, utilizar la Calculadora para obtener resultados de comprobación de sus propios artículos, desarrollar futuros modelos numéricos e incluso podría aportar valor a nivel industrial y comercial, a nivel de fabricante, utilizando una herramienta similar a esta para probar las condiciones de los combustibles en el diseño de motores.
- Por otro lado, se cumple con un objetivo final del presente Trabajo, que es el de realizar un estudio de los diferentes combustibles que se han seleccionado, aplicando los conocimientos adquiridos sobre MCIA y velocidades de combustión laminar, y utilizando la herramienta desarrollada de manera propia para obtener resultados de interés.
- A partir de estos resultados, se han obtenido conclusiones específicas sobre el comportamiento de la velocidad de combustión laminar durante el proceso de combustión, como que tiende a aumentar en función de los aumentos de temperatura, que consiguen combustiones más rápidas. Del mismo modo, para la mayoría de los combustibles se obtienen velocidades más bajas en función de los aumentos de presión.

- Con referencia a los combustibles, se puede concluir que los combustibles primarios de referencia PRF, sobre todo en combinación entre ellos, son buenos sustitutos de la gasolina de cara a la experimentación, pues alcanzan resultados similares, sobre todo para iso–octano, y eliminan el factor de variación que presenta la gasolina al cambiar de composición continuamente y al tener diferentes añadidos según épocas del año, como es el caso de los anticongelantes. Por otro lado, el metano como fuente principal del gas natural resulta un gran sustituto de la gasolina y uno de los grandes motores alternativos a investigar, consiguiendo comportamientos similares pero con mejores resultados.
- En último lugar, se puede concluir la indiscutible importancia del hidrógeno como fuente principal de energía en MCIA y otros muchos sectores, debido a su origen completamente limpio y a sus increíbles resultados tanto en combinación con el metano como de manera aislada.

A partir de estas conclusiones, se reafirman los conocimientos adquiridos y el gran aporte de la realización de este Trabajo, que cierra toda una etapa universitaria.

## 5.2. Líneas futuras

Como todo Proyecto de investigación que se realiza, los objetivos y conclusiones se limitan a un alcance prefijado al inicio del desarrollo, aunque siempre podría llegar un paso más allá y profundizar todo el trabajo realizado.

En este caso, la principal línea de desarrollo de este Trabajo, y para el que ha sido concebido, es la de ampliar la herramienta de recopilación bibliográfica que se ha desarrollado con Excel, añadiendo más artículos de referencia a los combustibles seleccionados y además otro tipo de combustibles alternativos, como el etanol, el metanol, el gas licuado del petróleo o el biogás.

Por otro lado, también se podrían ampliar las funcionalidades de la aplicación, automatizando no solo las búsquedas de los combustibles de manera individual, si no también sus mezclas, incluyendo entrada de datos para que el usuario pueda

seleccionar diferentes proporciones en cada búsqueda. Sería una opción muy interesante que completaría la utilidad de la aplicación.

Otra de las líneas de desarrollo en base a la aplicación, sería desarrollarla en una plataforma online, para hacerla más accesible a usuarios diferentes al campo de la investigación, sin estar limitados a poder utilizarla solamente con la herramienta Excel. La convertiría en una fuente de consulta y de comprobación para cualquier interesado en la materia.

Por último, otra de las líneas que se podrían haber ampliado, es la de obtener resultados no solo para uno de los autores o artículos seleccionados, si no para varios de ellos, y poder elaborar comparaciones entre los diferentes autores y sus metodologías experimentales, sin necesidad de repetir toda esta experimentación en el laboratorio.

Cualquiera de estas líneas de desarrollo del proyecto sería interesante y completaría la intencionalidad con la que se realiza.

### 5.3. Aportaciones

Se destacan las siguientes aportaciones tras la realización del presente TFM:

- La realización de un amplio estudio bibliográfico sobre el proceso de combustión de combustibles tanto gaseosos como líquidos, centrado en la importancia de la velocidad de combustión en dicho proceso.
- El desarrollo de una herramienta práctica programada en Visual Basic (VBA) para obtener de manera sencilla las velocidades de combustión, fácilmente ampliable, y que además completa la función de recopilación bibliográfica única de consulta.
- Estudio paramétrico y comparación entre los resultados de velocidades de combustión obtenidos con la herramienta desarrollada, para la gasolina como combustible tradicional y otros combustibles clasificados como alternativos, como el metano y el hidrógeno.

# Referencias

- [1] «Observatorio del Transporte y la Logística en España (OTLE)», *Sostenibilidad*. [En línea]. Disponible en: <https://observatoriotransporte.mitma.gob.es/sostenibilidad>. [Accedido: 23-abr-2020].
- [2] K. Bartholdy, «BP Statistical Review of World Energy», *Econ. Transit.*, vol. 1, n.º 1, pp. 123-134, 2019.
- [3] M. L. Soria García-Ramos, «Evolución de la reglamentación europea sobre emisiones y homologación de los vehículos Índice »:, *Motorpoint*, pp. 1-26, 2017.
- [4] F. Payri González y J. M. Desantes Fernández, *Motores de combustión interna alternativos*. Valencia [etc: Universidad Politécnica de Valencia [etc.], 2011.
- [5] M. Reyes Serrano, «Caracterización de la combustión y el autoencendido de combustibles líquidos en mezclas homogéneas para su uso en motores térmicos en modo HCCI ». s.n.], s.l, 2008.
- [6] Delphi Technologies, «Worldwide emissions standards - Passenger cars and light duty vehicles», 2020.
- [7] Continental Automotive, «Worldwide Emission Standards and Related Regulations», 2019.
- [8] F. Tinaut, A. Melgar, B. Gimenez, y M. Reyes, «Characterization of the combustion of biomass producer gas in a constant volume combustion bomb», *Fuel*, vol. 89, pp. 724-731, mar. 2010.
- [9] F. Tinaut, A. Melgar, B. Gimenez, y M. Reyes, «Prediction of performance and emissions of an engine fuelled with natural gas/hydrogen blends», *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, pp. 947-956, ene. 2011.
- [10] F. Tinaut, B. Gimenez, D. Hoyos, y M. Lawes, «Experimental Determination of the Burning Velocity of Mixtures of n-Heptane and Toluene in Engine-like Conditions», *Flow, Turbul. Combust.*, vol. 89, sep. 2012.
- [11] 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, feb.

- 2018.
- [12] F. V. Tinaut, M. Reyes, A. Melgar, y B. Giménez, «Optical characterization of hydrogen-air laminar combustion under cellularity conditions», *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, n.º 25, pp. 12857-12871, may 2019.
- [13] J. M. Riesco-Ávila, A. Gallegos-Muñoz, J. M. Montefort-Sánchez, y S. Martínez-Martínez, «Procesos Alternativos de Combustión en Motores de Combustión Interna.», *Acta Univ.*, vol. 15, n.º 1, pp. 36-54, abr. 2005.
- [14] «Tipos de Motores - Información sobre bicimotos, motores para bicicleta y bicicletas con motor». [En línea]. Disponible en: <http://www.bicimotos.info/tipos-de-motores>. [Accedido: 05-may-2020].
- [15] A. Lecuona, P. Rodríguez, M. Legrand, y V. Rubén, «Apuntes Motores de Combustión Interna UC3M. Capítulo 7: Combustión en MEP-MIF».
- [16] J. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*. 1988.
- [17] J. A. Álvarez Flórez *et al.*, Eds., *Motores alternativos de combustión interna*. Barcelona: Edicions UPC, 2005.
- [18] M. Nieto Salinas, «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». 2019.
- [19] M. Faghih y Z. Chen, «The constant-volume propagating spherical flame method for laminar flame speed measurement», *Sci. Bull.*, vol. 61, n.º 16, pp. 1296-1310, ago. 2016.
- [20] G. Andrews y D. Bradley, «Determination of burning velocities: A critical review», *Combust. Flame*, vol. 18, pp. 133-153, feb. 1972.
- [21] A. Lafuente Lafuente, «Metodología para el diagnóstico de la velocidad de combustión laminar de mezclas de gases combustibles a partir de la medida de presión instantánea en una bomba de combustión a volumen constante». [s.n.], s.l., 2008.
- [22] A. Maaren, D. THUNG, y P. Goey, «Measurement of Flame Temperature and Adiabatic Burning Velocity of Methane/Air Mixtures», *Combust. Sci. Technol.*, vol. 96, pp. 327-344, ene. 1994.
- [23] K. Saeed y R. Stone, «Laminar burning velocities of propene-air mixtures at elevated temperatures and pressures», *J. Energy Inst.*, vol. 80, pp. 73-82, jun. 2007.
- [24] F. N. Egolfopoulos, P. Cho, y C. K. Law, «Laminar flame speeds of methane-air mixtures under reduced and elevated pressures», *Combust. Flame*, vol. 76, n.º 3, pp. 375-391, 1989.

- 
- [25] R. Xu *et al.*, «A physics-based approach to modeling real-fuel combustion chemistry – II. Reaction kinetic models of jet and rocket fuels», *Combust. Flame*, vol. 193, pp. 520-537, 2018.
- [26] C. Arcoumanis, Ed., *Flow and combustion in reciprocating engines*. Berlin: Springer, 2009.
- [27] D. Bradley, M. Lawes, y M. E. Morsy, «Flame speed and particle image velocimetry measurements of laminar burning velocities and Markstein numbers of some hydrocarbons», *Fuel*, vol. 243, pp. 423-432, may 2019.
- [28] D. Bradley, M. Lawes, y M. E. Morsy, «Measurement of turbulence characteristics in a large scale fan-stirred spherical vessel», *J. Turbul.*, vol. 20, n.º 3, pp. 195-213, mar. 2019.
- [29] 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, oct. 1998.
- [30] J. H. Tien y M. Matalon, «On the burning velocity of stretched flames», *Combust. Flame*, vol. 84, n.º 3-4, pp. 238-248, abr. 1991.
- [31] M. Metghalchi y J. C. Keck, «Laminar burning velocity of propane-air mixtures at high temperature and pressure», *Combust. Flame*, vol. 38, n.º C, pp. 143-154, 1980.
- [32] 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, oct. 2016.
- [33] 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, ene. 2005.
- [34] H. J. Kull, «Theory of the Rayleigh-Taylor instability», *Physics Reports*, vol. 206, n.º 5. North-Holland, pp. 197-325, 01-ago-1991.
- [35] A. Palm-Leis y R. A. Strehlow, «On the propagation of turbulent flames», *Combust. Flame*, vol. 13, n.º 2, pp. 111-129, abr. 1969.
- [36] K. K. Kuo, *Principles of combustion*. New York [etc: John Wiley & Sons, 1986.
- [37] J. Botha y D. Spalding, «The Laminar Flame Speed of Propane/Air Mixtures with Heat Extraction from the Flame», *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 225, pp. 71-96, ago. 1954.

- [38] R. T. E. Hermanns, A. A. Konnov, R. J. M. Bastiaans, L. P. H. de Goey, K. Lucka, y H. Köhne, «Effects of temperature and composition on the laminar burning velocity of CH<sub>4</sub> + H<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> + N<sub>2</sub> flames», *Fuel*, vol. 89, n.º 1, pp. 114-121, ene. 2010.
- [39] A. MAAREN y P. Goey, «Laser Doppler Thermometry in Flat Flames», *Combust. Sci. Technol. - COMBUST SCI TECHNOL*, vol. 99, pp. 105-118, ago. 1994.
- [40] Mallard y L. Chatelier, «Recherches sur la combustion des mélanges gazeux explosifs», may 2020.
- [41] Z. Zhao, J. P. Conley, A. Kazakov, y F. L. Dryer, «Burning Velocities of Real Gasoline Fuel at 353 K and 500 K», *SAE Trans.*, vol. 112, pp. 2624-2629, abr. 2003.
- [42] O. Manna, M. S. Mansour, W. L. Roberts, y S. H. Chung, «Laminar burning velocities at elevated pressures for gasoline and gasoline surrogates associated with RON», *Combust. Flame*, vol. 162, n.º 6, pp. 2311-2321, jun. 2015.
- [43] N. Morgan, A. Smallbone, A. Bhave, M. Kraft, R. Cracknell, y G. Kalghatgi, «Mapping surrogate gasoline compositions into RON/MON space», *Combust. Flame*, vol. 157, n.º 6, pp. 1122-1131, jun. 2010.
- [44] H. Espinoza, L. Patiño, Y. González, y L. Irving, «A predictive model of natural gas mixture combustion in internal combustion engines», *Ing. e Investig.*, vol. 27, ago. 2007.
- [45] F. Yan, L. Xu, y Y. Wang, «Application of hydrogen enriched natural gas in spark ignition IC engines: from fundamental fuel properties to engine performances and emissions», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82. Elsevier Ltd, pp. 1457-1488, 01-feb-2018.
- [46] Sergi Alcalde, «Ventajas e inconvenientes del hidrógeno como combustible alternativo», *National Geographic España*, 08-dic-2019. [En línea]. Disponible en: [https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/ventajas-e-inconvenientes-hidrogeno-como-combustible-alternativo\\_14897](https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/ventajas-e-inconvenientes-hidrogeno-como-combustible-alternativo_14897). [Accedido: 19-may-2020].
- [47] E. Álvarez Pérez, «Estudio de inestabilidades y caracterización del proceso de combustión de mezclas de metano-hidrógeno-aire en condiciones celulares». 2019.
- [48] L. M. Mayo Monge, «Análisis de conceptos y expresiones de la velocidad de combustión laminar en aire de hidrógeno y de mezclas hidrógeno - Gas Natural», Universidad de Valladolid, 2015.

- 
- [49] D. B. Rhodes y J. C. Keck, «Laminar Burning Speed Measurements of Indolene-Air-Diluent Mixtures at High Pressures and Temperatures». SAE International, 1985.
- [50] P. Dirrenberger *et al.*, «Measurements of laminar flame velocity for components of natural gas», *Energy and Fuels*, vol. 25, n.º 9, pp. 3875-3884, sep. 2011.
- [51] T. Iijima y T. Takeno, «Effects of temperature and pressure on burning velocity», *Combust. Flame*, vol. 65, n.º 1, pp. 35-43, jul. 1986.
- [52] «¿Qué es VBA? Microsoft Visual Basic de Microsoft office». [En línea]. Disponible en: <https://revistadigital.inesem.es/informatica-y-tics/que-es-vba/>. [Accedido: 31-ago-2020].
- [53] L. Sileghem *et al.*, «Laminar burning velocity of gasoline and the gasoline surrogate components iso-octane, n-heptane and toluene», *Fuel*, vol. 112, pp. 355-365, oct. 2013.
- [54] P. Dirrenberger *et al.*, «Laminar burning velocity of gasolines with addition of ethanol», *Fuel*, vol. 115, pp. 162-169, ene. 2014.
- [55] S. Bougrine, S. Richard, y D. Veynante, «On the combination of complex chemistry with a 0-D coherent flame model to account for the fuel properties in spark ignition engines simulations: Application to methane-air-diluent mixtures», *Proc. Combust. Inst.*, vol. 33, n.º 2, pp. 3123-3130, ene. 2011.
- [56] S. Bougrine, S. Richard, A. Nicolle, y D. Veynante, «Numerical study of laminar flame properties of diluted methane-hydrogen-air flames at high pressure and temperature using detailed chemistry», *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, n.º 18, pp. 12035-12047, sep. 2011.
- [57] K. J. Bosschaart y L. P. H. De Goeij, «The laminar burning velocity of flames propagating in mixtures of hydrocarbons and air measured with the heat flux method», *Combust. Flame*, vol. 136, n.º 3, pp. 261-269, feb. 2004.
- [58] P. Dirrenberger *et al.*, «Measurements of Laminar Flame Velocity for Components of Natural Gas», vol. 25, pp. 3875-3884, 2011.
- [59] T. Tahtouh, F. Halter, y C. Mounaïm-Rousselle, «Measurement of laminar burning speeds and Markstein lengths using a novel methodology», *Combust. Flame*, vol. 156, n.º 9, pp. 1735-1743, sep. 2009.
- [60] Ö. L. Gülder, «Correlations of laminar combustion data for alternative s.i. engine fuels», en *SAE Technical Papers*, 1984.
- [61] S. Verhelst, C. Tjoen, J. Vancoillie, y J. Demuynck, «A correlation for the laminar burning velocity for use in hydrogen spark ignition engine

- simulation», *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, n.º 1, pp. 957-974, ene. 2011.
- [62] U. Gerke, K. Steurs, P. Rebecchi, y K. Boulouchos, «Derivation of burning velocities of premixed hydrogen/air flames at engine-relevant conditions using a single-cylinder compression machine with optical access», *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, n.º 6, pp. 2566-2577, mar. 2010.
- [63] G. Kalghatgi, H. Babiker, y J. Badra, «A Simple Method to Predict Knock Using Toluene, N-Heptane and Iso-Octane Blends (TPRF) as Gasoline Surrogates», *SAE Int. J. Engines*, vol. 8, n.º 2, pp. 505-519, abr. 2015.
- [64] «Características del gas natural | Nedgia». [En línea]. Disponible en: <https://www.nedgia.es/conocenos/caracteristicas-del-gas-natural/>. [Accedido: 30-abr-2020].
- [65] G. S. Settles, *Schlieren and Shadowgraph Techniques*. Springer Berlin Heidelberg, 2001.
- [66]; Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica. Universidad de Valladolid, «Apuntes Motores de Combustión Interna Alternativos. Parámetros Característicos.»

# Anexos

A continuación, se adjunta el conjunto completo de fichas bibliográficas realizadas en la herramienta Microsoft Excel, y que componen la recopilación de velocidades de combustión laminar para los diferentes combustibles seleccionados, tanto convencionales como alternativos.



# GASOLINA COMÚN

## FUENTE BIBLIOGRÁFICA

**PUBLICACIÓN** INTERNAL COMBUSTION ENGINE FUNDAMENTALS, CAPÍTULO 9: COMBUSTION IN SPARK-IGNITION ENGINES  
**AUTOR/ES** JOHN B. HEYWOOD  
**EDICIÓN** MC GRAW HILL SERIES IN MECHANICAL ENGINEERING  
**AÑO** 1988  
**ISSN/ISBN** 978-1-26-011611-3  
**ENLACE** [https://almena.uva.es/permalink/34BUC\\_UVA/eseo99/alma991003500659705774](https://almena.uva.es/permalink/34BUC_UVA/eseo99/alma991003500659705774)

**PUBLICACIÓN** MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS, CAPÍTULO 18: COMBUSTIÓN EN MEP  
**AUTOR/ES** EDITORES LIBRO: J.M. DESANTES, F. PAYRI - AUTORES CAPÍTULO: F.V. TINAUT, J.J. LÓPEZ  
**EDICIÓN** EDITORIAL REVERTÉ, EDITORIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA  
**AÑO** 2011  
**ISSN/ISBN** 978-84-8363-705-0  
**ENLACE** [https://almena.uva.es/permalink/34BUC\\_UVA/eseo99/alma991000535189705774](https://almena.uva.es/permalink/34BUC_UVA/eseo99/alma991000535189705774)

## COMBUSTIBLE

**TIPO** GASOLINA  
**NOMBRE** RMFD 303  
**COMPOSICIÓN** SIN ESPECIFICAR  
**PROPIEDADES** PESO MOLECULAR MEDIO 107 KG/MOL, RELACIÓN H/C 1,69  
**GAS RESIDUAL** COMPOSICIÓN: 80% N<sub>2</sub>, 20% CO<sub>2</sub>

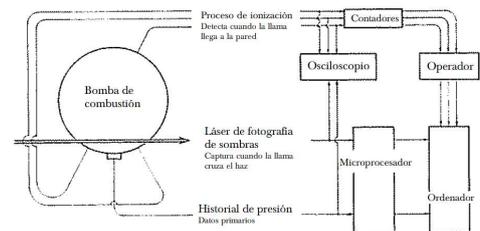
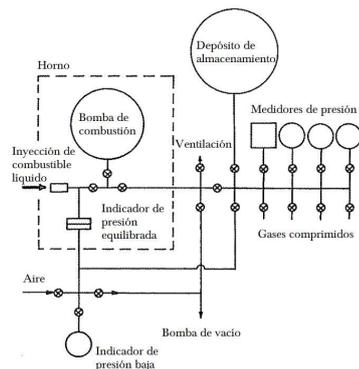
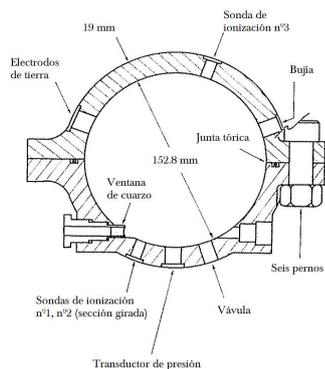
**PUBLICACIÓN** LAMINAR BURNING SPEED MEASUREMENTS OF INDOLENE-AIR-DILUENT MIXTURES AT HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES  
**AUTOR/ES** DAVID B. RHODES, JAMES C. KECK  
**EDICIÓN** SAE INTERNATIONAL CONGRESS AND EXPOSITION  
**AÑO** 1985  
**ISSN/ISBN** ISSN: 0148-7191, e-ISSN: 2688-3627  
**ENLACE** <https://doi.org/10.4271/850047>

# GASOLINA COMÚN

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

**MÉTODO**  
**CLASIFICACIÓN**  
**INSTRUMENTAL**

BOMBA DE COMBUSTIÓN ESFÉRICA CON IGNICIÓN CENTRAL  
 LLAMAS QUE SE PROPAGAN LIBREMENTE, BOMBA, MEDIDA DE LA PRESIÓN  
 TRANSDUCTOR PIEZOELECTRICO KISTLER 603B1, AMPLIFICADOR 504A, MICROPROCESADOR ADAC 1000, OSCILOSCOPIO



## EXPRESIONES DE CÁLCULO

**CORRELACIÓN**  
**RANGO VALIDEZ**  
**C.REFERENCIA**

METGHALCHI Y KECK  
 PRESIÓN: 1 BAR - 8 BAR, TEMPERATURA: 298K - 700K  
 PRESIÓN: 1 BAR - TEMPERATURA: 298K

| Presión en C.R. | Temperatura en C.R. |
|-----------------|---------------------|
| $p^0$           | $T^0$               |
| bar             | K                   |
| 1               | 298                 |

**EXP. PRINCIPAL**

$$u_L [cm/s] = u_L^0 \cdot \left(\frac{T}{T^0}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{P}{P^0}\right)^\beta$$

**EXP. AUXILIARES**

$$u_L^0 [cm/s] = 30,5 - 54,9 \cdot (\varphi - 1,21)^2$$

$$\alpha = 2,4 - 0,271 \cdot \varphi^{3,51}$$

$$\beta = -0,357 + 0,14 \cdot \varphi^{2,77}$$

## TABLAS DE DATOS

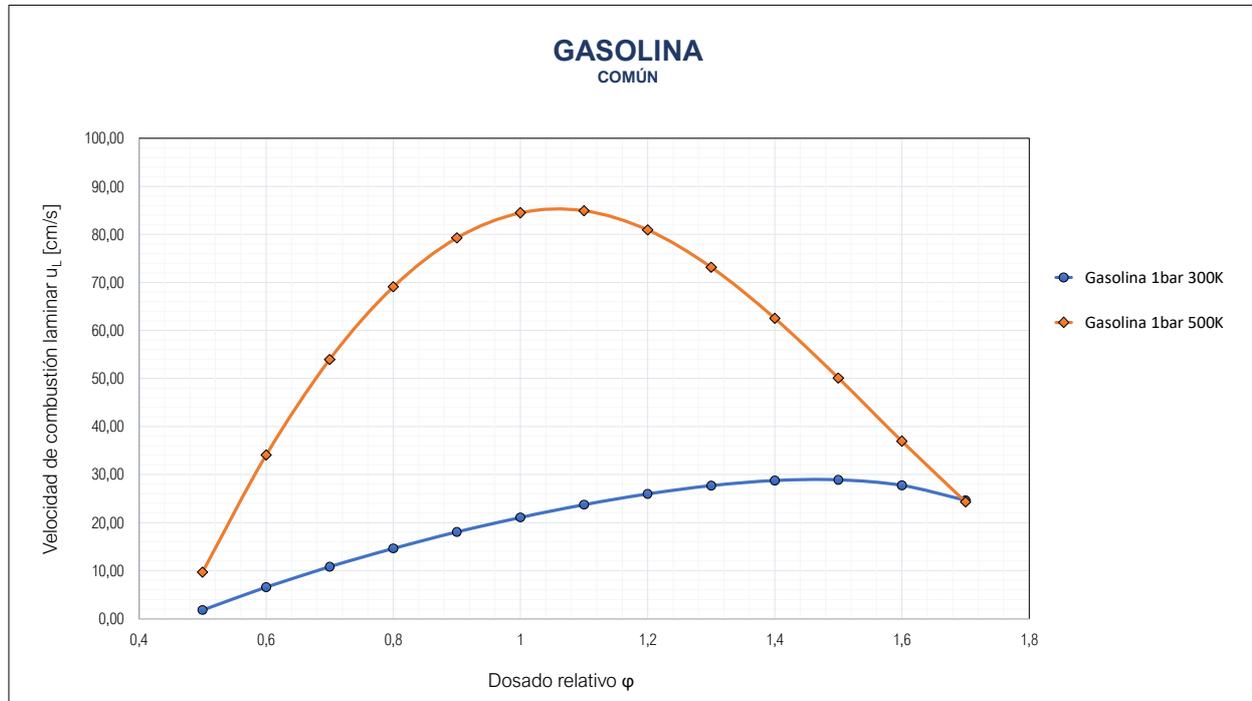
### GASOLINA COMÚN 1 BAR 300 K

| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |             |                            | PARÁMETROS DE CÁLCULO                   |                             |                                    |                             |                                | PARÁMETROS DE GRÁFICA      |                                 |
|--------------------------|-------------|----------------------------|---|-----------------------------|------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| Presión                  | Temperatura | Dosado relativo            | Velocidad de combustión laminar en C.R. | Relación de temperaturas    | Coef. termodinámico de temperatura | Relación de presiones       | Coef. termodinámico de presión | Dosado relativo            | Velocidad de combustión laminar |
| $P$<br>bar               | $T$<br>K    | $\phi$<br>[unidimensional] | $u_L^0$<br>cm/s                         | $T/T^0$<br>[unidimensional] | $\alpha$<br>[unidimensional]       | $p/p^0$<br>[unidimensional] | $\beta$<br>[unidimensional]    | $\phi$<br>[unidimensional] | $u_L$<br>cm/s                   |
| 4                        | 300         | 0,5                        | 2,82                                    | 1,01                        | 2,3762                             | 4,00                        | -0,3365                        | 0,5                        | 1,80                            |
| 4                        | 300         | 0,6                        | 10,07                                   | 1,01                        | 2,3549                             | 4,00                        | -0,3230                        | 0,6                        | 6,54                            |
| 4                        | 300         | 0,7                        | 16,22                                   | 1,01                        | 2,3225                             | 4,00                        | -0,3049                        | 0,7                        | 10,80                           |
| 4                        | 300         | 0,8                        | 21,27                                   | 1,01                        | 2,2762                             | 4,00                        | -0,2815                        | 0,8                        | 14,62                           |
| 4                        | 300         | 0,9                        | 25,22                                   | 1,01                        | 2,2128                             | 4,00                        | -0,2524                        | 0,9                        | 18,04                           |
| 4                        | 300         | 1                          | 28,08                                   | 1,01                        | 2,1290                             | 4,00                        | -0,2170                        | 1                          | 21,08                           |
| 4                        | 300         | 1,1                        | 29,84                                   | 1,01                        | 2,0213                             | 4,00                        | -0,1747                        | 1,1                        | 23,74                           |
| 4                        | 300         | 1,2                        | 30,49                                   | 1,01                        | 1,8861                             | 4,00                        | -0,1250                        | 1,2                        | 25,97                           |
| 4                        | 300         | 1,3                        | 30,06                                   | 1,01                        | 1,7194                             | 4,00                        | -0,0674                        | 1,3                        | 27,69                           |
| 4                        | 300         | 1,4                        | 28,52                                   | 1,01                        | 1,5172                             | 4,00                        | -0,0014                        | 1,4                        | 28,75                           |
| 4                        | 300         | 1,5                        | 25,88                                   | 1,01                        | 1,2753                             | 4,00                        | 0,0734                         | 1,5                        | 28,90                           |
| 4                        | 300         | 1,6                        | 22,15                                   | 1,01                        | 0,9893                             | 4,00                        | 0,1577                         | 1,6                        | 27,74                           |
| 4                        | 300         | 1,7                        | 17,32                                   | 1,01                        | 0,6548                             | 4,00                        | 0,2518                         | 1,7                        | 24,66                           |

### GASOLINA COMÚN 1 BAR 500 K

| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |             |                            | PARÁMETROS DE CÁLCULO                   |                             |                                    |                             |                                | PARÁMETROS DE GRÁFICA      |                                 |
|--------------------------|-------------|----------------------------|---|-----------------------------|------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| Presión                  | Temperatura | Dosado relativo            | Velocidad de combustión laminar en C.R. | Relación de temperaturas    | Coef. termodinámico de temperatura | Relación de presiones       | Coef. termodinámico de presión | Dosado relativo            | Velocidad de combustión laminar |
| $P$<br>bar               | $T$<br>K    | $\phi$<br>[unidimensional] | $u_L^0$<br>cm/s                         | $T/T^0$<br>[unidimensional] | $\alpha$<br>[unidimensional]       | $p/p^0$<br>[unidimensional] | $\beta$<br>[unidimensional]    | $\phi$<br>[unidimensional] | $u_L$<br>cm/s                   |
| 1                        | 500         | 0,5                        | 2,82                                    | 1,68                        | 2,3762                             | 1,00                        | -0,3365                        | 0,5                        | 9,66                            |
| 1                        | 500         | 0,6                        | 10,07                                   | 1,68                        | 2,3549                             | 1,00                        | -0,3230                        | 0,6                        | 34,07                           |
| 1                        | 500         | 0,7                        | 16,22                                   | 1,68                        | 2,3225                             | 1,00                        | -0,3049                        | 0,7                        | 53,96                           |
| 1                        | 500         | 0,8                        | 21,27                                   | 1,68                        | 2,2762                             | 1,00                        | -0,2815                        | 0,8                        | 69,08                           |
| 1                        | 500         | 0,9                        | 25,22                                   | 1,68                        | 2,2128                             | 1,00                        | -0,2524                        | 0,9                        | 79,28                           |
| 1                        | 500         | 1                          | 28,08                                   | 1,68                        | 2,1290                             | 1,00                        | -0,2170                        | 1                          | 84,50                           |
| 1                        | 500         | 1,1                        | 29,84                                   | 1,68                        | 2,0213                             | 1,00                        | -0,1747                        | 1,1                        | 84,93                           |
| 1                        | 500         | 1,2                        | 30,49                                   | 1,68                        | 1,8861                             | 1,00                        | -0,1250                        | 1,2                        | 80,93                           |
| 1                        | 500         | 1,3                        | 30,06                                   | 1,68                        | 1,7194                             | 1,00                        | -0,0674                        | 1,3                        | 73,17                           |
| 1                        | 500         | 1,4                        | 28,52                                   | 1,68                        | 1,5172                             | 1,00                        | -0,0014                        | 1,4                        | 62,53                           |
| 1                        | 500         | 1,5                        | 25,88                                   | 1,68                        | 1,2753                             | 1,00                        | 0,0734                         | 1,5                        | 50,08                           |
| 1                        | 500         | 1,6                        | 22,15                                   | 1,68                        | 0,9893                             | 1,00                        | 0,1577                         | 1,6                        | 36,96                           |
| 1                        | 500         | 1,7                        | 17,32                                   | 1,68                        | 0,6548                             | 1,00                        | 0,2518                         | 1,7                        | 24,30                           |

## GRÁFICAS





# GASOLINA

## COMÚN ERG-TRAPPING

### FUENTE BIBLIOGRÁFICA

**PUBLICACIÓN** INTERNAL COMBUSTION ENGINE FUNDAMENTALS, CAPÍTULO 9: COMBUSTION IN SPARK-IGNITION ENGINES  
**AUTOR/ES** JOHN B. HEYWOOD  
**EDICIÓN** MC GRAW HILL SERIES IN MECHANICAL ENGINEERING  
**AÑO** 1988  
**ISSN/ISBN** 978-1-26-011611-3  
**ENLACE** [https://almena.uva.es/permalink/34BUC\\_UVA/eseo99/alma991003500659705774](https://almena.uva.es/permalink/34BUC_UVA/eseo99/alma991003500659705774)

**PUBLICACIÓN** MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS, CAPÍTULO 18: COMBUSTIÓN EN MEP  
**AUTOR/ES** EDITORES LIBRO: J.M. DESANTES, F. PAYRI - AUTORES CAPÍTULO: F.V. TINAUT, J.J. LÓPEZ  
**EDICIÓN** EDITORIAL REVERTÉ, EDITORIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA  
**AÑO** 2011  
**ISSN/ISBN** 978-84-8363-705-0  
**ENLACE** [https://almena.uva.es/permalink/34BUC\\_UVA/eseo99/alma991000535189705774](https://almena.uva.es/permalink/34BUC_UVA/eseo99/alma991000535189705774)

### COMBUSTIBLE

**TIPO** GASOLINA  
**NOMBRE** RMFD 303  
**COMPOSICIÓN** SIN ESPECIFICAR  
**PROPIEDADES** PESO MOLECULAR MEDIO 107 KG/MOL, RELACIÓN H/C 1,69  
**GAS RESIDUAL** COMPOSICIÓN: 80% N<sub>2</sub>, 20% CO<sub>2</sub>

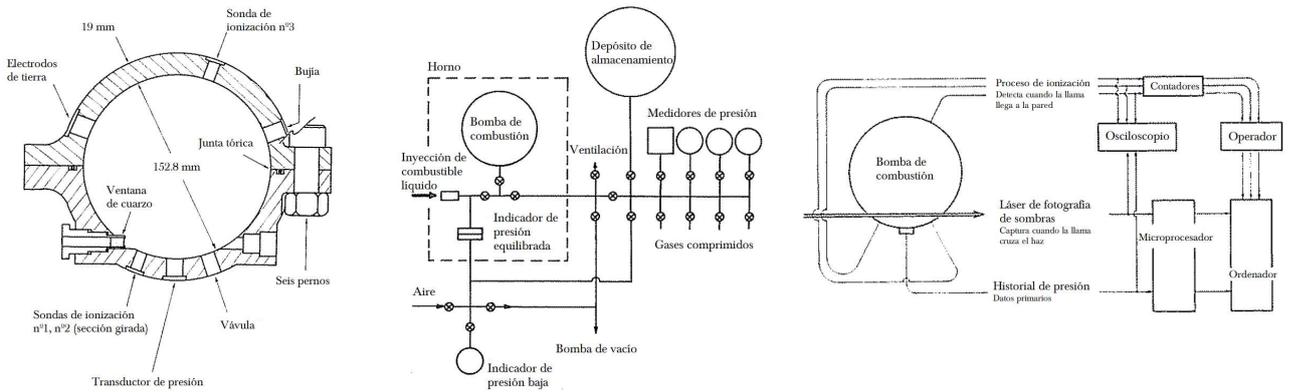
**PUBLICACIÓN** LAMINAR BURNING SPEED MEASUREMENTS OF INDOLENE-AIR-DILUENT MIXTURES AT HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES  
**AUTOR/ES** DAVID B. RHODES, JAMES C. KECK  
**EDICIÓN** SAE INTERNATIONAL CONGRESS AND EXPOSITION  
**AÑO** 1985  
**ISSN/ISBN** ISSN: 0148-7191, e-ISSN: 2688-3627  
**ENLACE** <https://doi.org/10.4271/850047>

# GASOLINA COMÚN ERG-TRAPPING

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

**MÉTODO**  
**CLASIFICACIÓN**  
**INSTRUMENTAL**

BOMBA DE COMBUSTIÓN ESFÉRICA CON IGNICIÓN CENTRAL  
 LLAMAS QUE SE PROPAGAN LIBREMENTE, BOMBA, MEDIDA DE LA PRESIÓN  
 TRANSDUCTOR PIEZOELÉCTRICO KISTLER 603B1, AMPLIFICADOR 504A, MICROPROCESADOR ADAC 1000, OSCILOSCOPIO



## EXPRESIONES DE CÁLCULO

**CORRELACIÓN**  
**RANGO VALIDEZ**

METGHALCHI Y KECK  
 PRESIÓN: 1 BAR - 8 BAR, TEMPERATURA: 298K - 700K  
 FRACCIÓN MÁSCICA  $Y_{dil}$ : 0-0,2

| Presión en C.R. | Temperatura en C.R. |
|-----------------|---------------------|
| $p^0$           | $T^0$               |
| bar             | K                   |
| 1               | 298                 |

**C.REFERENCIA**

PRESIÓN: 1 BAR - TEMPERATURA: 298K

**EXP. PRINCIPAL**

$$u_L [cm/s] = u_L^0 \cdot \left(\frac{T}{T^0}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{P}{P^0}\right)^\beta$$

Fracción máscica de gases quemados

**EXP. AUXILIARES**

$$u_L (Y_{dil}) [cm/s] = (1 - 2,1Y_{dil}) \cdot u_L (Y_{dil} = 0)$$

$$u_L^0 [cm/s] = 30,5 - 54,9 \cdot (\varphi - 1,21)^2$$

$$\alpha = 2,4 - 0,271 \cdot \varphi^{3,51}$$

$$\beta = -0,357 + 0,14 \cdot \varphi^{2,77}$$

|                       |
|-----------------------|
| $Y_{dil}$             |
| [unidimensional], %/1 |
| 0,1                   |

## TABLAS DE DATOS

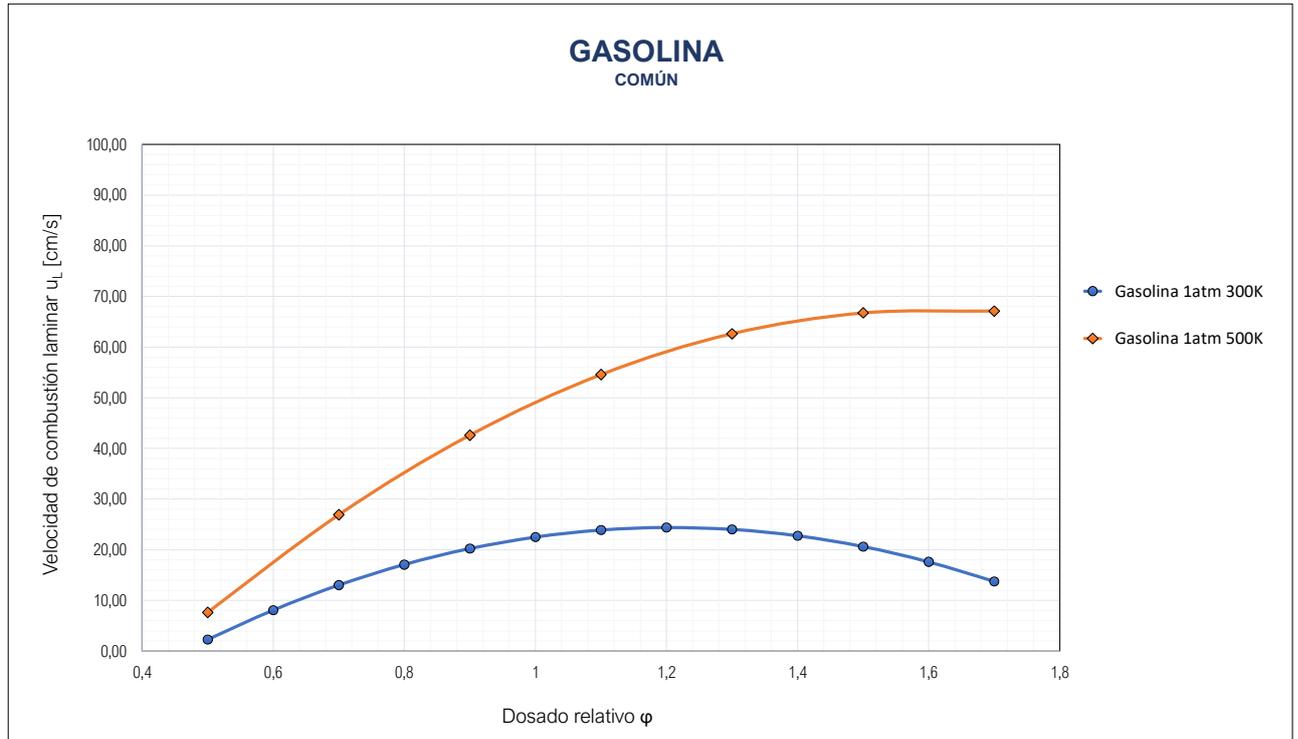
### GASOLINA COMÚN 1 BAR 300 K

| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |                  | PARÁMETROS DE CÁLCULO                   |                          |                                    |                       |                                | PARÁMETROS DE GRÁFICA |                                     |
|--------------------------|------------------|---|--------------------------|------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| Temperatura              | Dosado relativo  | Velocidad de combustión laminar en C.R. | Relación de temperaturas | Coef. termodinámico de temperatura | Relación de presiones | Coef. termodinámico de presión | Dosado relativo       | Velocidad de combustión laminar ERG |
| $T$                      | $\varphi$        | $u_L^0$                                 | $T/T^0$                  | $\alpha$                           | $p/p^0$               | $\beta$                        | $\varphi$             | $u_L (Y_{air})$                     |
| K                        | [unidimensional] | cm/s                                    | [unidimensional]         | [unidimensional]                   | [unidimensional]      | [unidimensional]               | [unidimensional]      | cm/s                                |
| 300                      | 0,5              | 2,82                                    | 1,01                     | 2,3762                             | 1,00                  | -0,3365                        | 0,5                   | 2,27                                |
| 300                      | 0,6              | 10,07                                   | 1,01                     | 2,3549                             | 1,00                  | -0,3230                        | 0,6                   | 8,08                                |
| 300                      | 0,7              | 16,22                                   | 1,01                     | 2,3225                             | 1,00                  | -0,3049                        | 0,7                   | 13,01                               |
| 300                      | 0,8              | 21,27                                   | 1,01                     | 2,2762                             | 1,00                  | -0,2815                        | 0,8                   | 17,06                               |
| 300                      | 0,9              | 25,22                                   | 1,01                     | 2,2128                             | 1,00                  | -0,2524                        | 0,9                   | 20,22                               |
| 300                      | 1                | 28,08                                   | 1,01                     | 2,1290                             | 1,00                  | -0,2170                        | 1                     | 22,50                               |
| 300                      | 1,1              | 29,84                                   | 1,01                     | 2,0213                             | 1,00                  | -0,1747                        | 1,1                   | 23,89                               |
| 300                      | 1,2              | 30,49                                   | 1,01                     | 1,8861                             | 1,00                  | -0,1250                        | 1,2                   | 24,40                               |
| 300                      | 1,3              | 30,06                                   | 1,01                     | 1,7194                             | 1,00                  | -0,0674                        | 1,3                   | 24,02                               |
| 300                      | 1,4              | 28,52                                   | 1,01                     | 1,5172                             | 1,00                  | -0,0014                        | 1,4                   | 22,76                               |
| 300                      | 1,5              | 25,88                                   | 1,01                     | 1,2753                             | 1,00                  | 0,0734                         | 1,5                   | 20,62                               |
| 300                      | 1,6              | 22,15                                   | 1,01                     | 0,9893                             | 1,00                  | 0,1577                         | 1,6                   | 17,61                               |
| 300                      | 1,7              | 17,32                                   | 1,01                     | 0,6548                             | 1,00                  | 0,2518                         | 1,7                   | 13,74                               |

### GASOLINA COMÚN 1 BAR 500 K

| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |                  | PARÁMETROS DE CÁLCULO                   |                          |                                    |                       |                                | PARÁMETROS DE GRÁFICA |                                     |
|--------------------------|------------------|---|--------------------------|------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| Temperatura              | Dosado relativo  | Velocidad de combustión laminar en C.R. | Relación de temperaturas | Coef. termodinámico de temperatura | Relación de presiones | Coef. termodinámico de presión | Dosado relativo       | Velocidad de combustión laminar ERG |
| $T$                      | $\varphi$        | $u_L^0$                                 | $T/T^0$                  | $\alpha$                           | $p/p^0$               | $\beta$                        | $\varphi$             | $u_L (Y_{air})$                     |
| K                        | [unidimensional] | cm/s                                    | [unidimensional]         | [unidimensional]                   | [unidimensional]      | [unidimensional]               | [unidimensional]      | cm/s                                |
| 500                      | 0,5              | 2,82                                    | 1,68                     | 2,3762                             | 1,00                  | -0,3365                        | 0,5                   | 7,63                                |
| 500                      | 0,6              | 10,07                                   | 1,68                     | 2,3549                             | 1,00                  | -0,3230                        | 0,6                   | 26,92                               |
| 500                      | 0,7              | 16,22                                   | 1,68                     | 2,3225                             | 1,00                  | -0,3049                        | 0,7                   | 42,63                               |
| 500                      | 0,8              | 21,27                                   | 1,68                     | 2,2762                             | 1,00                  | -0,2815                        | 0,8                   | 54,58                               |
| 500                      | 0,9              | 25,22                                   | 1,68                     | 2,2128                             | 1,00                  | -0,2524                        | 0,9                   | 62,63                               |
| 500                      | 1                | 28,08                                   | 1,68                     | 2,1290                             | 1,00                  | -0,2170                        | 1                     | 66,76                               |
| 500                      | 1,1              | 29,84                                   | 1,68                     | 2,0213                             | 1,00                  | -0,1747                        | 1,1                   | 67,09                               |
| 500                      | 1,2              | 30,49                                   | 1,68                     | 1,8861                             | 1,00                  | -0,1250                        | 1,2                   | 63,94                               |
| 500                      | 1,3              | 30,06                                   | 1,68                     | 1,7194                             | 1,00                  | -0,0674                        | 1,3                   | 57,81                               |
| 500                      | 1,4              | 28,52                                   | 1,68                     | 1,5172                             | 1,00                  | -0,0014                        | 1,4                   | 49,40                               |
| 500                      | 1,5              | 25,88                                   | 1,68                     | 1,2753                             | 1,00                  | 0,0734                         | 1,5                   | 39,56                               |
| 500                      | 1,6              | 22,15                                   | 1,68                     | 0,9893                             | 1,00                  | 0,1577                         | 1,6                   | 29,20                               |
| 500                      | 1,7              | 17,32                                   | 1,68                     | 0,6548                             | 1,00                  | 0,2518                         | 1,7                   | 19,20                               |

## GRÁFICAS





# GASOLINA

EXXON 708629-60

## FUENTE BIBLIOGRÁFICA

|             |  |
|-------------|--|
| PUBLICACIÓN | LAMINAR BURNING VELOCITY OF GASOLINE AND THE GASOLINE SURROGATE COMPONENTS ISO-OCTANE, N-HEPTANE AND TOLUENE |
| AUTOR/ES    | L. SILEGHEM, V.A. ALEKSEEV, J. VANCOILLIE, K.M. VAN GEEM, E.J.K. NILSSON, S.VERHELST, A.A. KONNOV            |
| EDICIÓN     | ELSEVIER. REVISTA <i>FUEL</i> VOLUMEN 112, PÁGINAS 355-365   |
| AÑO         | 2013   |
| ISSN/ISBN   | 0016-2361  |
| ENLACE      | <a href="https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.049">https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.049</a>          |

## COMBUSTIBLE

|             |   |
|-------------|---|
| TIPO        | GASOLINA  |
| NOMBRE      | EXXON 708629-60   |
| COMPOSICIÓN | 10,37% V/V N-ALCANOS, 40,2% V/V ISO-ALCANOS, 34,39% V/V AROMÁTICOS, 9,39% V/V NAFTENOS Y 5,65% V/V OLEFINAS |

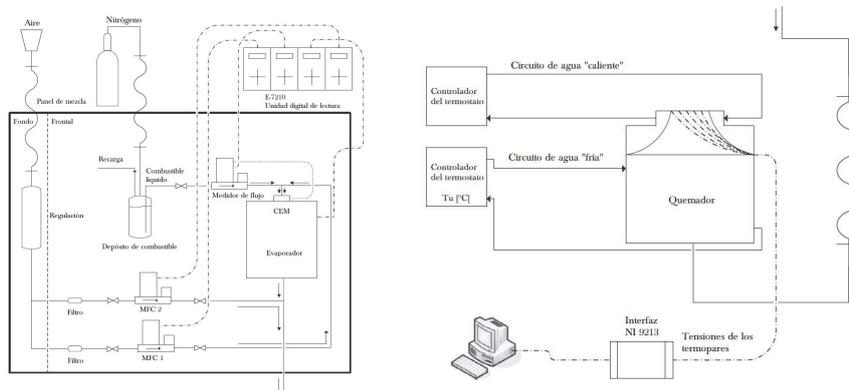
# GASOLINA

## EXXON 708629-60

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

**MÉTODO**  
**CLASIFICACIÓN**  
**INSTRUMENTAL**

FLUJO DE CALOR EN UN QUEMADOR DE PLACAS PERFORADAS  
 LLAMAS ESTACIONARIAS, QUEMADOR, LLAMA PLANA, CON CONTROL DEL FLUJO DE CALOR  
 PLACA DE QUEMADOR DE 2MM PERFORADA, CONTROLADOR DE FLUJO DE MASA LÍQUIDO CORI-FLOW (MFC), EVAPORADOR  
 MEZCLADOR CONTROLADO (CEM)



## EXPRESIONES DE CÁLCULO

**CORRELACIÓN**  
**RANGO VALIDEZ**  
**C.REFERENCIA**

INTERPOLACIÓN POLINÓMICA DE GRÁFICAS EN ARTÍCULO  
 DOSADO RELATIVO: 0,7 - 1,3 TEMPERATURA: 298K - 358K  
 PRESIÓN: 1 BAR - TEMPERATURA: 298K

Presión en C.R.

Temperatura en C.R.

 $p^0$ 
 $T^0$ 

bar

K

1

298

**EXP. PRINCIPAL**

$$u_L [cm/s] = -74,335 \cdot \varphi^3 + 79,631 \cdot \varphi^2 + 90,816 \cdot \varphi - 49,665$$



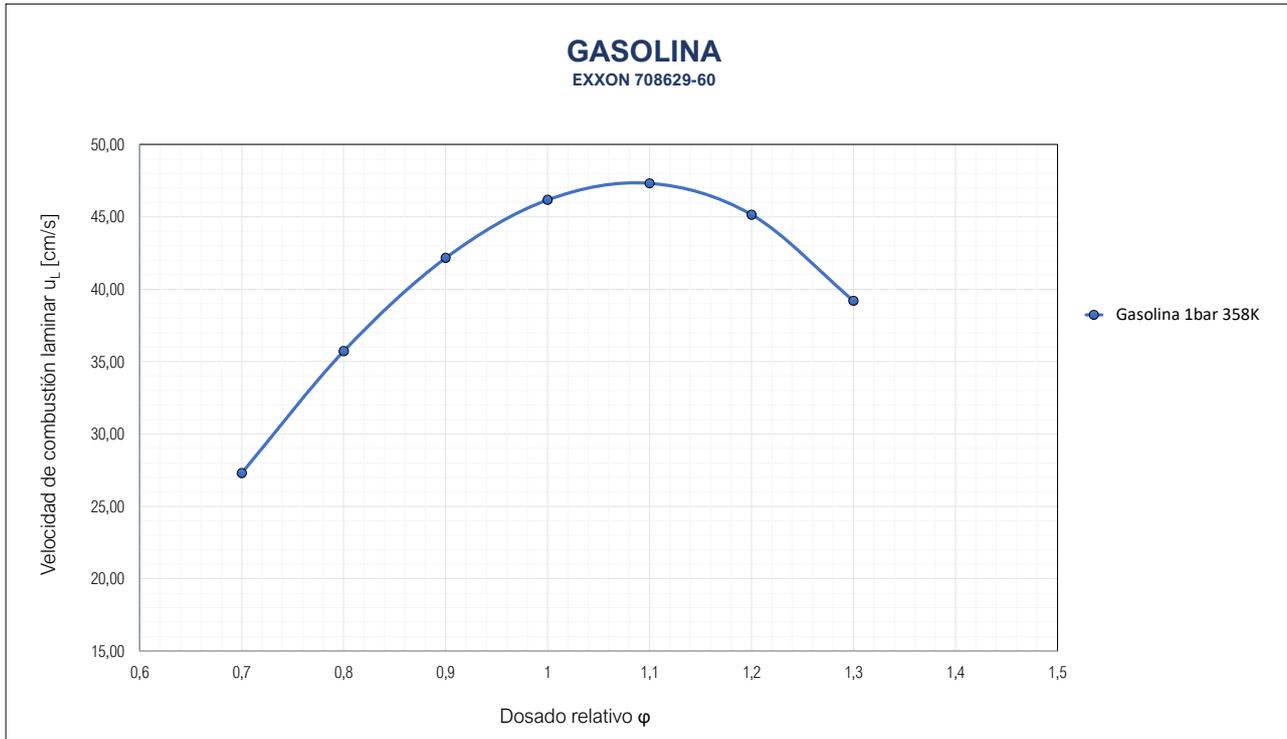
# TABLAS DE DATOS

## GASOLINA EXXON 708629-60 1 BAR 358 K

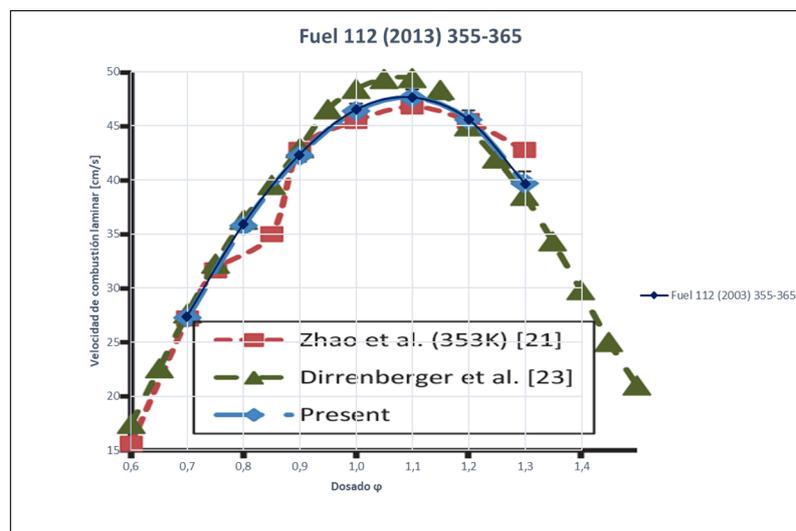
| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |             |                  |
|--------------------------|-------------|------------------|
| Presión                  | Temperatura | Dosado relativo  |
| $P$                      | $T$         | $\varphi$        |
| bar                      | K           | [unidimensional] |
| 1                        | 358         | 0,7              |
| 1                        | 358         | 0,8              |
| 1                        | 358         | 0,9              |
| 1                        | 358         | 1                |
| 1                        | 358         | 1,1              |
| 1                        | 358         | 1,2              |
| 1                        | 358         | 1,3              |

| PARÁMETROS DE GRÁFICA |                                 |
|-----------------------|---------------------------------|
| Dosado relativo       | Velocidad de combustión laminar |
| $\varphi$             | $u_L$                           |
| [unidimensional]      | cm/s                            |
| 0,7                   | 27,30                           |
| 0,8                   | 35,72                           |
| 0,9                   | 42,16                           |
| 1                     | 46,18                           |
| 1,1                   | 47,32                           |
| 1,2                   | 45,14                           |
| 1,3                   | 39,20                           |

## GRÁFICAS



## GRÁFICA ARTÍCULO ORIGINAL





# GASOLINA

## CR-87 (SIN PLOMO)

### FUENTE BIBLIOGRÁFICA

|             |   |
|-------------|---|
| PUBLICACIÓN | BURNING VELOCITIES OF REAL GASOLINE FUEL AT 353K AND 500K                                 |
| AUTOR/ES    | ZHENWEI ZHAO, JORDAN P.CONLEY, ANDREI KAZAKOV AND FREDERICK L. DRYER                      |
| EDICIÓN     | SAE INTERNATIONAL, VOLUMEN 112 PÁGINAS 2624-2629  |
| AÑO         | 2003  |
| ISSN/ISBN   | 0096736X, 25771531  |
| ENLACE      | <a href="https://www.jstor.org/stable/44742478">https://www.jstor.org/stable/44742478</a> |

### COMBUSTIBLE

|             |   |
|-------------|---|
| TIPO        | GASOLINA  |
| NOMBRE      | CR-87 CONVENCIONAL SIN PLOMO  |
| COMPOSICIÓN | 87% DE ISO-OCTANO, 3% DE HEPTANO, RESTO MÁS DE 100 COMPONENTES EN COMPOSICIÓN RELATIVA INFERIOR AL 2% |
| PROPIEDADES | 87 OCTANOS  |

# GASOLINA

## CR-87 (SIN PLOMO)

### METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

**MÉTODO**  
**CLASIFICACIÓN**  
**INSTRUMENTAL**

LLAMA DE ESTANCAMIENTO DE PARED DE CHORRO Y VELOCIMETRÍA DE IMAGEN DE PARTÍCULAS (PIV)  
 LLAMAS ESTACIONARIAS, LLAMAS DE FLUJO DIVERGENTE Y QUEMADOR POR VELOCIMETRÍA  
 QUEMADOR CON CALENTADOR OMEGA®, LÁSER CONTINUUM® MINILITE PIV ND:YAG COMO FUENTE DE ILUMINACIÓN PARA PIV, CÁMARA KODAK DCS 460 DE 3060x2036 PÍXELES PARA GRABACIÓN DE IMÁGENES

### EXPRESIONES DE CÁLCULO

**CORRELACIÓN**  
**RANGO VALIDEZ**  
**C.REFERENCIA**

INTERPOLACIÓN POLINÓMICA DE GRÁFICAS EN ARTÍCULO  
 DOSADO RELATIVO: 0,6 - 1,5 TEMPERATURA: 298K - 500K  
 PRESIÓN: 1 BAR - TEMPERATURA: 298K

| Presión en C.R. | Temperatura en C.R. |
|-----------------|---------------------|
| $p^0$           | $T^0$               |
| bar             | K                   |
| 1               | 298                 |

**EXP. PRINCIPAL**

*Para T=353 K:*  
 $u_i [cm/s] = -13,538 \cdot \varphi^3 - 72,592 \cdot \varphi^2 + 213,38 \cdot \varphi - 82,422$

*Para T=500 K:*  
 $u_i [cm/s] = 64,281 \cdot \varphi^3 - 403,86 \cdot \varphi^2 + 641,68 \cdot \varphi - 214,21$



## TABLAS DE DATOS

### GASOLINACR-87 (SIN PLOMO) 1 BAR 353 K

| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |             |                  |
|--------------------------|-------------|------------------|
| Presión                  | Temperatura | Dosado relativo  |
| $P$                      | $T$         | $\varphi$        |
| bar                      | K           | [unidimensional] |
| 1                        | 353         | 0,6              |
| 1                        | 353         | 0,7              |
| 1                        | 353         | 0,8              |
| 1                        | 353         | 0,9              |
| 1                        | 353         | 1                |
| 1                        | 353         | 1,1              |
| 1                        | 353         | 1,2              |
| 1                        | 353         | 1,3              |
| 1                        | 353         | 1,4              |
| 1                        | 353         | 1,5              |

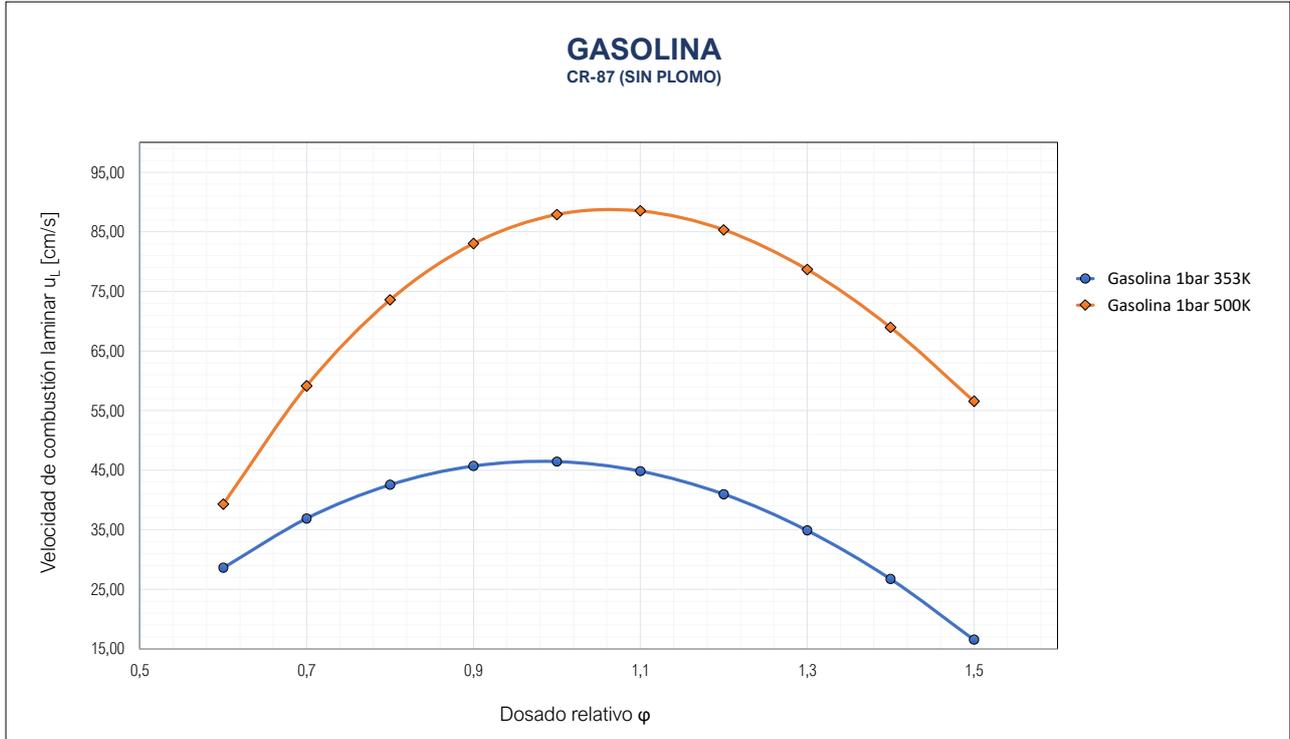
| PARÁMETROS DE GRÁFICA |                                 |
|-----------------------|---------------------------------|
| Dosado relativo       | Velocidad de combustión laminar |
| $\varphi$             | $u_L$                           |
| [unidimensional]      | cm/s                            |
| 0,6                   | 16,55                           |
| 0,7                   | 26,73                           |
| 0,8                   | 34,89                           |
| 0,9                   | 40,95                           |
| 1                     | 44,83                           |
| 1,1                   | 46,44                           |
| 1,2                   | 45,71                           |
| 1,3                   | 42,55                           |
| 1,4                   | 36,88                           |
| 1,5                   | 28,63                           |

### GASOLINACR-87 (SIN PLOMO) 1 BAR 500 K

| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |             |                  |
|--------------------------|-------------|------------------|
| Presión                  | Temperatura | Dosado relativo  |
| $P$                      | $T$         | $\varphi$        |
| bar                      | K           | [unidimensional] |
| 1                        | 500         | 0,6              |
| 1                        | 500         | 0,7              |
| 1                        | 500         | 0,8              |
| 1                        | 500         | 0,9              |
| 1                        | 500         | 1                |
| 1                        | 500         | 1,1              |
| 1                        | 500         | 1,2              |
| 1                        | 500         | 1,3              |
| 1                        | 500         | 1,4              |
| 1                        | 500         | 1,5              |

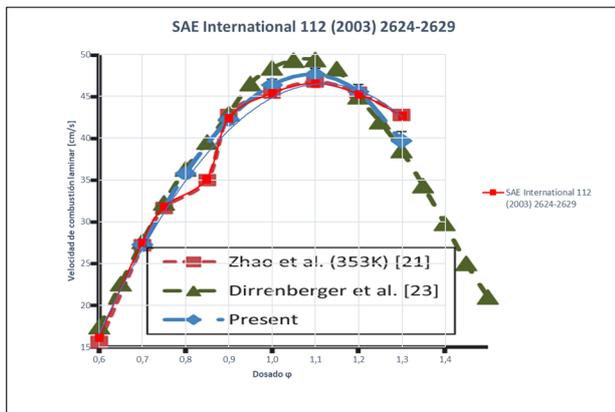
| PARÁMETROS DE GRÁFICA |                                 |
|-----------------------|---------------------------------|
| Dosado relativo       | Velocidad de combustión laminar |
| $\varphi$             | $u_L$                           |
| [unidimensional]      | cm/s                            |
| 0,6                   | 39,29                           |
| 0,7                   | 59,12                           |
| 0,8                   | 73,58                           |
| 0,9                   | 83,04                           |
| 1                     | 87,89                           |
| 1,1                   | 88,53                           |
| 1,2                   | 85,33                           |
| 1,3                   | 78,68                           |
| 1,4                   | 68,96                           |
| 1,5                   | 56,57                           |

# GRÁFICAS

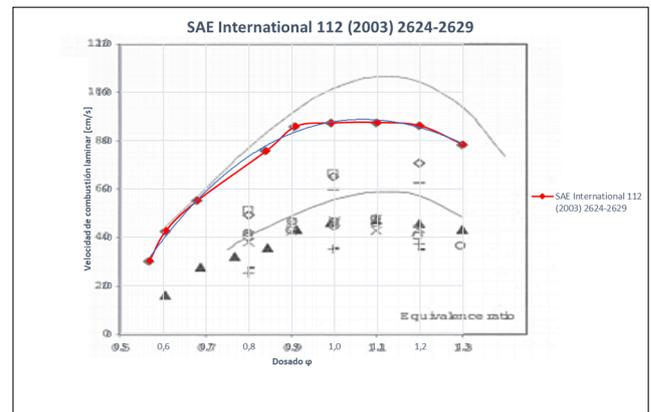


## GRÁFICA ARTÍCULO ORIGINAL

Gasolina 353 K



Gasolina 500 K





# GASOLINA

## TAE7000

## FUENTE BIBLIOGRÁFICA

|             |  |
|-------------|--|
| PUBLICACIÓN | LAMINAR BURNING VELOCITY OF GASOLINES WITH ADDITION OF ETHANOL   |
| AUTOR/ES    | P. DIRRENBERGER, P.A. GLAUDE, R. BOUNACEUR, H. LE GALL, A. PIRES DA CRUZ, A.A. KONNOV, F. BATTIN-LECLERC |
| EDICIÓN     | ELSEVIER. REVISTA <i>FUEL</i> VOLUMEN 115, PÁGINAS 162-169   |
| AÑO         | 2014   |
| ISSN/ISBN   | 0016-2361  |
| ENLACE      | <a href="https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.015">https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.015</a>      |

## COMBUSTIBLE

|             |  |
|-------------|--|
| TIPO        | GASOLINA   |
| NOMBRE      | TAE7000  |
| COMPOSICIÓN | 0,5% (VOL.) DE N-ALCANOS, 40,7% DE ISO-ALCANOS Y 32,5% DE COMPUESTOS AROMÁTICOS, SIENDO EL RESTO COMPUESTOS CÍCLICOS, INSATURADOS Y OXIGENADOS |
| PROPIEDADES | 95 OCTANOS   |

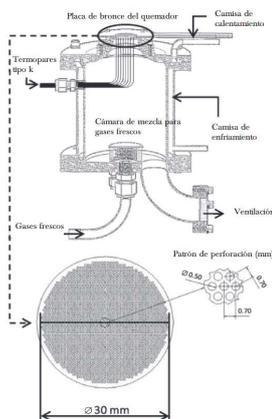
# GASOLINA

## TAE7000

### METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

**MÉTODO**  
**CLASIFICACIÓN**  
**INSTRUMENTAL**

FLUJO DE CALOR EN UN QUEMADOR DE LLAMA PLANA  
 LLAMAS ESTACIONARIAS, QUEMADOR, LLAMA PLANA, CON CONTROL DEL FLUJO DE CALOR  
 PLACA DE QUEMADOR DE 0,5MM PERFORADA CON ESPACIOS DE 0,7MM ENTRE PERFORACIONES, CONTROLADOR DE FLUJO DE MASA LÍQUIDO CORI-FLOW (MFC)



### EXPRESIONES DE CÁLCULO

**CORRELACIÓN**  
**RANGO VALIDEZ**  
**C.REFERENCIA**

INTERPOLACIÓN POLINÓMICA DE GRÁFICAS EN ARTÍCULO  
 DOSADO RELATIVO: 0,6 - 1,8 TEMPERATURA: 298K - 398K  
 PRESIÓN: 1 BAR - TEMPERATURA: 298K

| Presión en C.R. | Temperatura en C.R. |
|-----------------|---------------------|
| $p^0$           | $T^0$               |
| bar             | K                   |
| 1               | 298                 |

**EXP. PRINCIPAL**

$$u_L [cm/s] = -7,2421 \cdot \varphi^3 - 128,13 \cdot \varphi^2 + 297,64 \cdot \varphi - 114,96$$



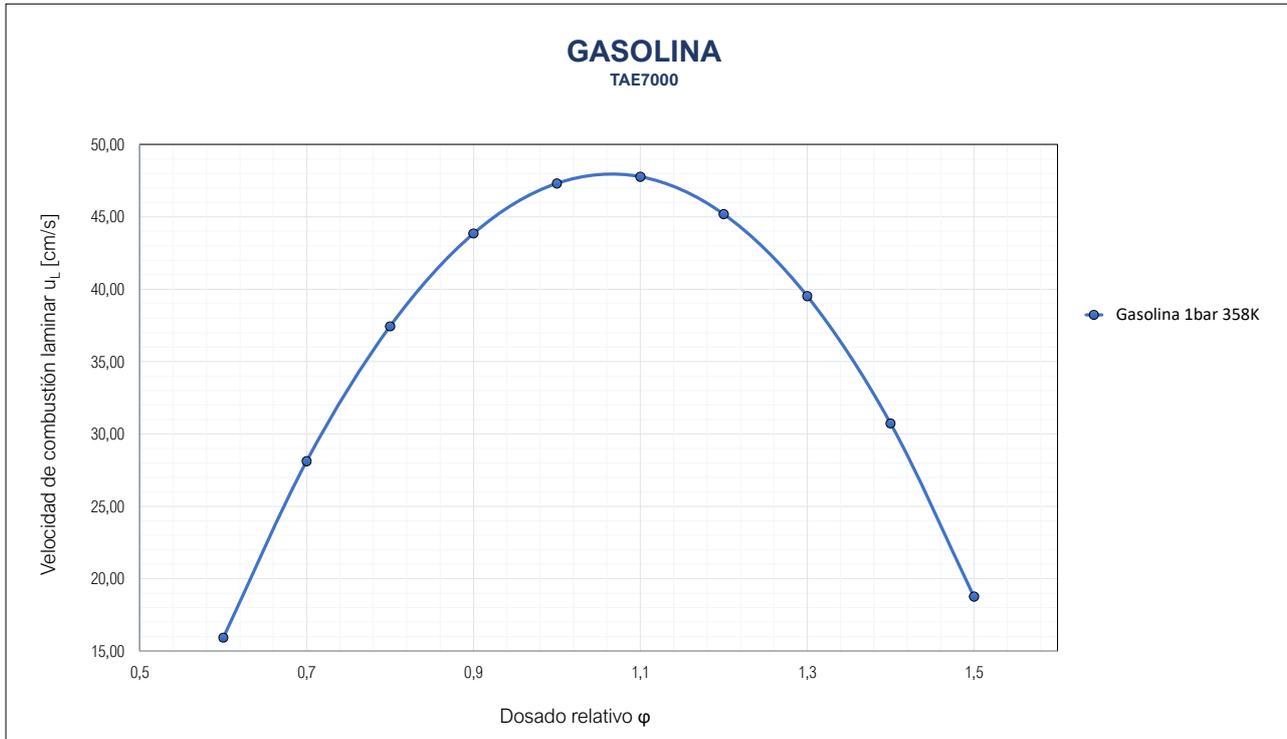
# TABLAS DE DATOS

## GASOLINA TAE7000 1 BAR 358 K

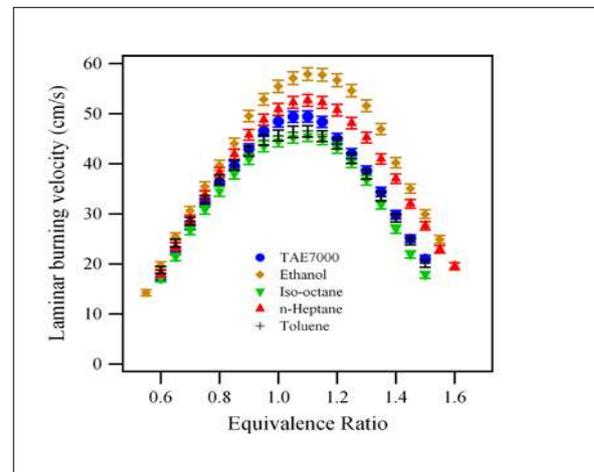
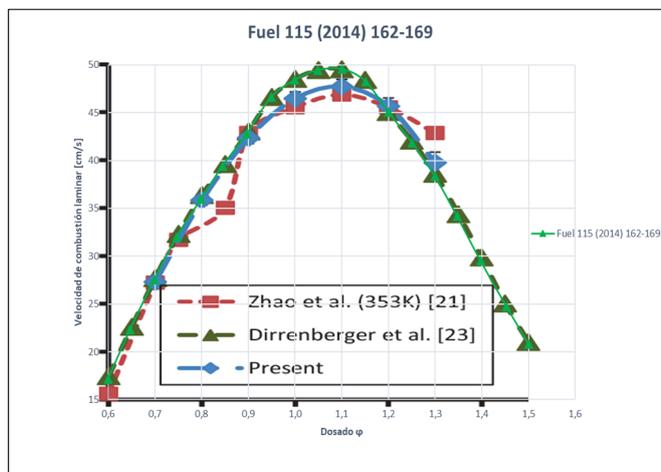
| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |             |                  |
|--------------------------|-------------|------------------|
| Presión                  | Temperatura | Dosado relativo  |
| $P$                      | $T$         | $\varphi$        |
| bar                      | K           | [unidimensional] |
| 1                        | 358         | 0,6              |
| 1                        | 358         | 0,7              |
| 1                        | 358         | 0,8              |
| 1                        | 358         | 0,9              |
| 1                        | 358         | 1                |
| 1                        | 358         | 1,1              |
| 1                        | 358         | 1,2              |
| 1                        | 358         | 1,3              |
| 1                        | 358         | 1,4              |
| 1                        | 358         | 1,5              |
| 1                        | 358         | 1,6              |

| PARÁMETROS DE GRÁFICA |                                 |
|-----------------------|---------------------------------|
| Dosado relativo       | Velocidad de combustión laminar |
| $\varphi$             | $u_L$                           |
| [unidimensional]      | cm/s                            |
| 0,6                   | 15,93                           |
| 0,7                   | 28,12                           |
| 0,8                   | 37,44                           |
| 0,9                   | 43,85                           |
| 1                     | 47,31                           |
| 1,1                   | 47,77                           |
| 1,2                   | 45,19                           |
| 1,3                   | 39,52                           |
| 1,4                   | 30,73                           |
| 1,5                   | 18,77                           |
| 1,6                   | 3,59                            |

## GRÁFICAS



## GRÁFICA ARTÍCULO ORIGINAL





# ISO-OCTANO

## HEYWOOD

## FUENTE BIBLIOGRÁFICA

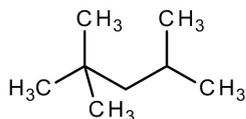
|             |   |
|-------------|---|
| PUBLICACIÓN | INTERNAL COMBUSTION ENGINE FUNDAMENTALS, CAPÍTULO 9: COMBUSTION IN SPARK-IGNITION ENGINES   |
| AUTOR/ES    | JOHN B. HEYWOOD   |
| EDICIÓN     | MC GRAW HILL SERIES IN MECHANICAL ENGINEERING   |
| AÑO         | 1988  |
| ISSN/ISBN   | 978-1-26-011611-3   |
| ENLACE      | <a href="https://almena.uva.es/permalink/34BUC_UVA/eseo99/alma991003500659705774">https://almena.uva.es/permalink/34BUC_UVA/eseo99/alma991003500659705774</a> |

|             |   |
|-------------|---|
| PUBLICACIÓN | MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS, CAPÍTULO 18: COMBUSTIÓN EN MEP  |
| AUTOR/ES    | EDITORES LIBRO: J.M. DESANTES, F. PAYRI - AUTORES CAPÍTULO: F.V. TINAUT, J.J. LÓPEZ   |
| EDICIÓN     | EDITORIAL REVERTÉ, EDITORIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA  |
| AÑO         | 2011  |
| ISSN/ISBN   | 978-84-8363-705-0   |
| ENLACE      | <a href="https://almena.uva.es/permalink/34BUC_UVA/eseo99/alma991000535189705774">https://almena.uva.es/permalink/34BUC_UVA/eseo99/alma991000535189705774</a> |

## COMBUSTIBLE

|             |  |
|-------------|--|
| TIPO        | ISO-OCTANO (DERIVADO DE GASOLINA)  |
| NOMBRES     | IUPAC: 2,2,4-TRIMETILPENTANO. OTROS: ISOCTANO, ISOOCTANO, CAS 540-84-1   |
| FÓRMULAS    | HILL: $C_8H_{18}$ , QUÍMICA SEMIDESARROLLADA: $CH_3C(CH_3)_2CH_2CH(CH_3)CH_3$  |
| PROPIEDADES | PUNTO DE EBULLICIÓN: 372,4K (99,3°C), PUNTO DE FUSIÓN: 165,77K (-107,3°C), MASA MOLAR: 114,23 g/mol, DENSIDAD: 0,69 g/cm <sup>3</sup> , OCTANAJE 100. LÍQUIDO VOLÁTIL, CLARO E INCOLORO, INMISCIBLE EN AGUA. |

### F. ESTRUCTURAL



# ISO-OCTANO

## HEYWOOD

### METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

**MÉTODO**

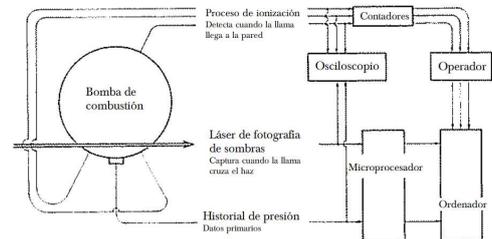
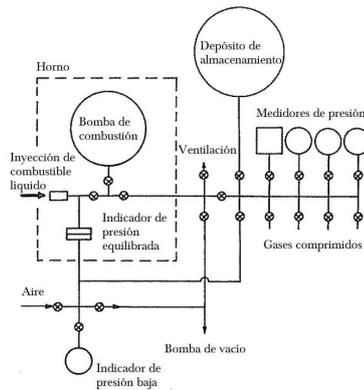
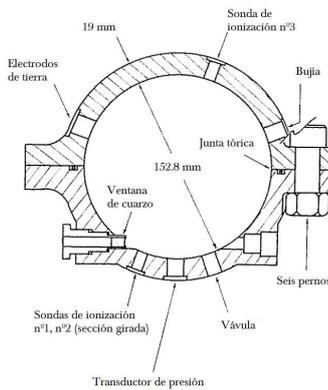
BOMBA DE COMBUSTIÓN ESFÉRICA CON IGNICIÓN CENTRAL

**CLASIFICACIÓN**

LLAMAS QUE SE PROPAGAN LIBREMENTE, BOMBA, MEDIDA DE LA PRESIÓN

**INSTRUMENTAL**

TRANSDUCTOR PIEZOELÉCTRICO KISTLER 603B1, AMPLIFICADOR 504A, MICROPROCESADOR ADAC 1000, OSCILOSCOPIO



### EXPRESIONES DE CÁLCULO

**CORRELACIÓN**

METGHALCHI Y KECK

**RANGO VALIDEZ**

PRESIÓN: 1 BAR - 8 BAR, TEMPERATURA: 298K - 700K

**C.REFERENCIA**

PRESIÓN: 1 BAR - TEMPERATURA: 298K

Presión en C.R.

Temperatura en C.R.

 $P^0$ 
 $T^0$ 

bar

K

1

298

**EXP. PRINCIPAL**

$$u_L [cm/s] = u_L^0 \cdot \left(\frac{T}{T^0}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{P}{P^0}\right)^\beta$$

**EXP. AUXILIARES**

$$u_L^0 [cm/s] = 26,3 - 84,7 \cdot (\varphi - 1,13)^2$$

$$\alpha = 2,18 - 0,8 \cdot (\varphi - 1)$$

$$\beta = -0,16 + 0,22 \cdot (\varphi - 1)$$



## TABLAS DE DATOS

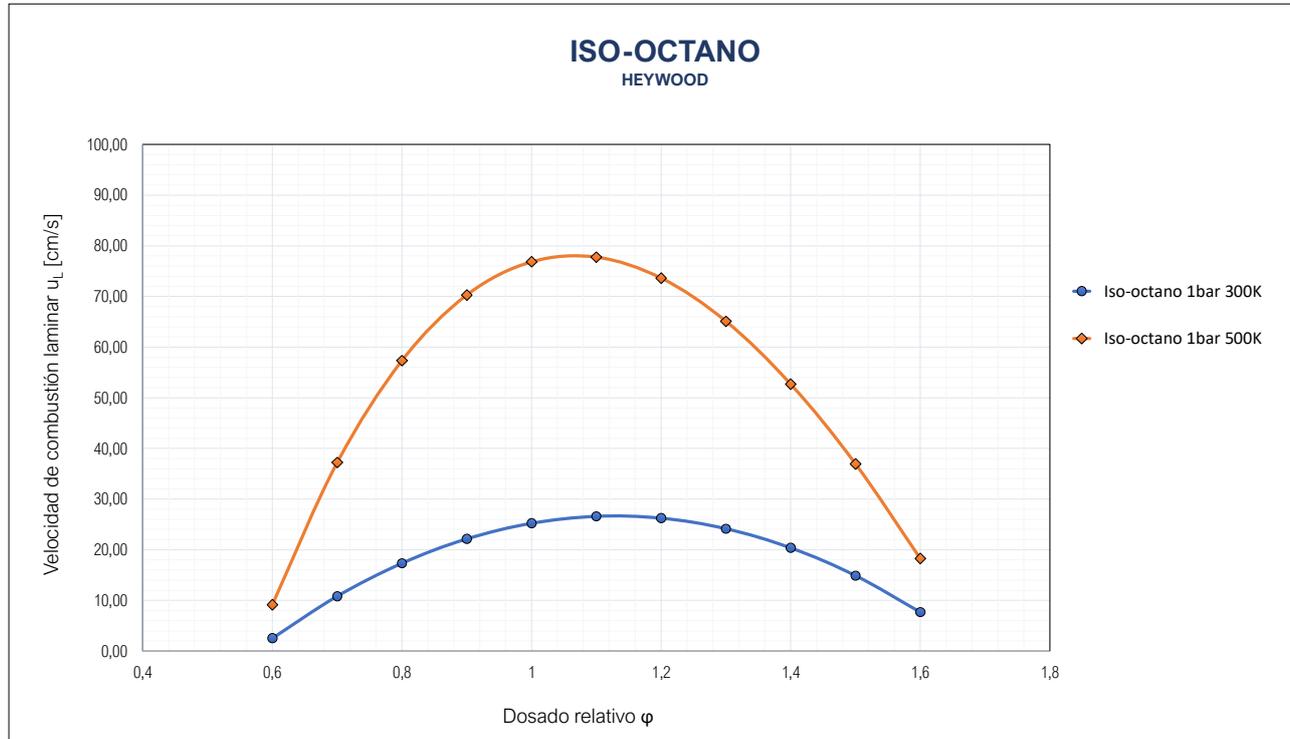
## ISO-OCTANO 1 BAR 300 K

| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |             |                  | PARÁMETROS DE CÁLCULO                   |                          |                                    |                       |                                | PARÁMETROS DE GRÁFICA |                                 |
|--------------------------|-------------|------------------|---|--------------------------|------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Presión                  | Temperatura | Dosado relativo  | Velocidad de combustión laminar en C.R. | Relación de temperaturas | Coef. termodinámico de temperatura | Relación de presiones | Coef. termodinámico de presión | Dosado relativo       | Velocidad de combustión laminar |
| $P$                      | $T$         | $\varphi$        | $u_L^0$                                 | $T/T^0$                  | $\alpha$                           | $P/P^0$               | $\beta$                        | $\varphi$             | $u_L$                           |
| bar                      | K           | [unidimensional] | cm/s                                    | [unidimensional]         | [unidimensional]                   | [unidimensional]      | [unidimensional]               | [unidimensional]      | cm/s                            |
| 1                        | 300         | 0,6              | 2,51                                    | 1,01                     | 2,5000                             | 1,00                  | -0,2480                        | 0,6                   | 2,55                            |
| 1                        | 300         | 0,7              | 10,64                                   | 1,01                     | 2,4200                             | 1,00                  | -0,2260                        | 0,7                   | 10,81                           |
| 1                        | 300         | 0,8              | 17,08                                   | 1,01                     | 2,3400                             | 1,00                  | -0,2040                        | 0,8                   | 17,35                           |
| 1                        | 300         | 0,9              | 21,82                                   | 1,01                     | 2,2600                             | 1,00                  | -0,1820                        | 0,9                   | 22,15                           |
| 1                        | 300         | 1                | 24,87                                   | 1,01                     | 2,1800                             | 1,00                  | -0,1600                        | 1                     | 25,23                           |
| 1                        | 300         | 1,1              | 26,22                                   | 1,01                     | 2,1000                             | 1,00                  | -0,1380                        | 1,1                   | 26,59                           |
| 1                        | 300         | 1,2              | 25,88                                   | 1,01                     | 2,0200                             | 1,00                  | -0,1160                        | 1,2                   | 26,24                           |
| 1                        | 300         | 1,3              | 23,85                                   | 1,01                     | 1,9400                             | 1,00                  | -0,0940                        | 1,3                   | 24,16                           |
| 1                        | 300         | 1,4              | 20,13                                   | 1,01                     | 1,8600                             | 1,00                  | -0,0720                        | 1,4                   | 20,38                           |
| 1                        | 300         | 1,5              | 14,70                                   | 1,01                     | 1,7800                             | 1,00                  | -0,0500                        | 1,5                   | 14,88                           |
| 1                        | 300         | 1,6              | 7,59                                    | 1,01                     | 1,7000                             | 1,00                  | -0,0280                        | 1,6                   | 7,68                            |

## ISO-OCTANO 1 BAR 500 K

| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |             |                  | PARÁMETROS DE CÁLCULO                   |                          |                                    |                       |                                | PARÁMETROS DE GRÁFICA |                                 |
|--------------------------|-------------|------------------|---|--------------------------|------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Presión                  | Temperatura | Dosado relativo  | Velocidad de combustión laminar en C.R. | Relación de temperaturas | Coef. termodinámico de temperatura | Relación de presiones | Coef. termodinámico de presión | Dosado relativo       | Velocidad de combustión laminar |
| $P$                      | $T$         | $\varphi$        | $u_L^0$                                 | $T/T^0$                  | $\alpha$                           | $P/P^0$               | $\beta$                        | $\varphi$             | $u_L$                           |
| bar                      | K           | [unidimensional] | cm/s                                    | [unidimensional]         | [unidimensional]                   | [unidimensional]      | [unidimensional]               | [unidimensional]      | cm/s                            |
| 1                        | 500         | 0,6              | 2,51                                    | 1,68                     | 2,5000                             | 1,00                  | -0,2480                        | 0,6                   | 9,14                            |
| 1                        | 500         | 0,7              | 10,64                                   | 1,68                     | 2,4200                             | 1,00                  | -0,2260                        | 0,7                   | 37,22                           |
| 1                        | 500         | 0,8              | 17,08                                   | 1,68                     | 2,3400                             | 1,00                  | -0,2040                        | 0,8                   | 57,32                           |
| 1                        | 500         | 0,9              | 21,82                                   | 1,68                     | 2,2600                             | 1,00                  | -0,1820                        | 0,9                   | 70,27                           |
| 1                        | 500         | 1                | 24,87                                   | 1,68                     | 2,1800                             | 1,00                  | -0,1600                        | 1                     | 76,84                           |
| 1                        | 500         | 1,1              | 26,22                                   | 1,68                     | 2,1000                             | 1,00                  | -0,1380                        | 1,1                   | 77,75                           |
| 1                        | 500         | 1,2              | 25,88                                   | 1,68                     | 2,0200                             | 1,00                  | -0,1160                        | 1,2                   | 73,63                           |
| 1                        | 500         | 1,3              | 23,85                                   | 1,68                     | 1,9400                             | 1,00                  | -0,0940                        | 1,3                   | 65,10                           |
| 1                        | 500         | 1,4              | 20,13                                   | 1,68                     | 1,8600                             | 1,00                  | -0,0720                        | 1,4                   | 52,70                           |
| 1                        | 500         | 1,5              | 14,70                                   | 1,68                     | 1,7800                             | 1,00                  | -0,0500                        | 1,5                   | 36,94                           |
| 1                        | 500         | 1,6              | 7,59                                    | 1,68                     | 1,7000                             | 1,00                  | -0,0280                        | 1,6                   | 18,29                           |

## GRÁFICAS





# ISO-OCTANO

## SILEGHEM

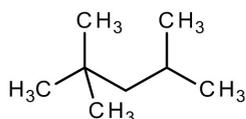
## FUENTE BIBLIOGRÁFICA

|             |  |
|-------------|--|
| PUBLICACIÓN | LAMINAR BURNING VELOCITY OF GASOLINE AND THE GASOLINE SURROGATE COMPONENTS ISO-OCTANE, N-HEPTANE AND TOLUENE |
| AUTOR/ES    | L. SILEGHEM, V.A. ALEKSEEV, J. VANCOILLIE, K.M. VAN GEEM, E.J.K. NILSSON, S.VERHELST, A.A. KONNOV            |
| EDICIÓN     | ELSEVIER. REVISTA <i>FUEL</i> VOLUMEN 112, PÁGINAS 355-365   |
| AÑO         | 2013   |
| ISSN/ISBN   | 0016-2361  |
| ENLACE      | <a href="https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.049">https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.049</a>          |

## COMBUSTIBLE

|             |  |
|-------------|--|
| TIPO        | ISO-OCTANO (DERIVADO DE GASOLINA)  |
| NOMBRES     | IUPAC: 2,2,4-TRIMETILPENTANO. OTROS: ISOCTANO, ISOOCTANO, CAS 540-84-1   |
| FÓRMULAS    | HILL: C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> , QUÍMICA SEMIDESARROLLADA: CH <sub>3</sub> C(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH(CH <sub>3</sub> )CH <sub>3</sub>  |
| PROPIEDADES | PUNTO DE EBULLICIÓN: 372,4K (99,3°C), PUNTO DE FUSIÓN: 165,77K (-107,3°C), MASA MOLAR: 114,23 g/mol, DENSIDAD: 0,69 g/cm <sup>3</sup> , OCTANAJE 100. LÍQUIDO VOLÁTIL, CLARO E INCOLORO, INMISCIBLE EN AGUA. |

### F. ESTRUCTURAL



# ISO-OCTANO

## SILEGHEM

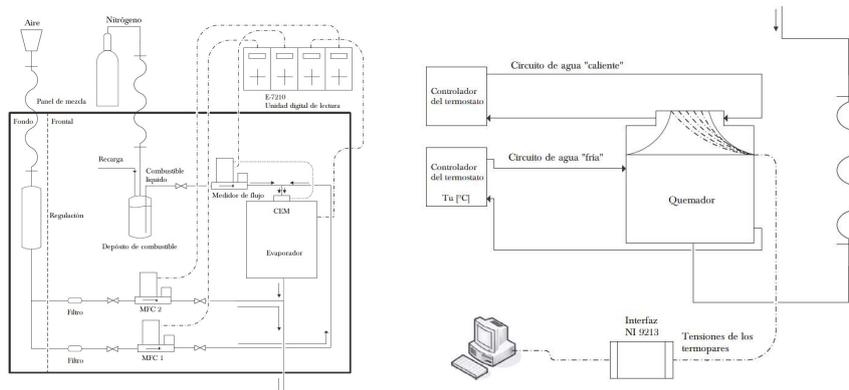
### METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

**MÉTODO**  
**CLASIFICACIÓN**  
**INSTRUMENTAL**

FLUJO DE CALOR EN UN QUEMADOR DE PLACAS PERFORADAS

LLAMAS ESTACIONARIAS, QUEMADOR, LLAMA PLANA, CON CONTROL DEL FLUJO DE CALOR

PLACA DE QUEMADOR DE 2MM PERFORADA, CONTROLADOR DE FLUJO DE MASA LÍQUIDO CORI-FLOW (MFC), EVAPORADOR MEZCLADOR CONTROLADO (CEM)



### EXPRESIONES DE CÁLCULO

**CORRELACIÓN**  
**RANGO VALIDEZ**  
**C.REFERENCIA**

INTERPOLACIÓN POLINÓMICA DE GRÁFICAS EN ARTÍCULO  
 DOSADO RELATIVO: 0,7 - 1,3 TEMPERATURA: 298K - 358K  
 PRESIÓN: 1 BAR - TEMPERATURA: 298K

Presión en C.R.

Temperatura en C.R.

$p^0$

$T^0$

bar

K

1

298

**EXP. PRINCIPAL**

Para 298K:

$$u_L [cm/s] = -66,028 \cdot \varphi^3 + 75,811 \cdot \varphi^2 + 71,625 \cdot \varphi - 48,497$$

Para 358K:

$$u_L [cm/s] = -50,09 \cdot \varphi^3 + 48,771 \cdot \varphi^2 + 75,499 \cdot \varphi - 41,407$$



## TABLAS DE DATOS

### ISO-OCTANO 1 BAR 298 K

| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |             |                  |
|--------------------------|-------------|------------------|
| Presión                  | Temperatura | Dosado relativo  |
| $P$                      | $T$         | $\varphi$        |
| bar                      | K           | [unidimensional] |
| 1                        | 298         | 0,7              |
| 1                        | 298         | 0,8              |
| 1                        | 298         | 0,9              |
| 1                        | 298         | 1                |
| 1                        | 298         | 1,1              |
| 1                        | 298         | 1,2              |
| 1                        | 298         | 1,3              |

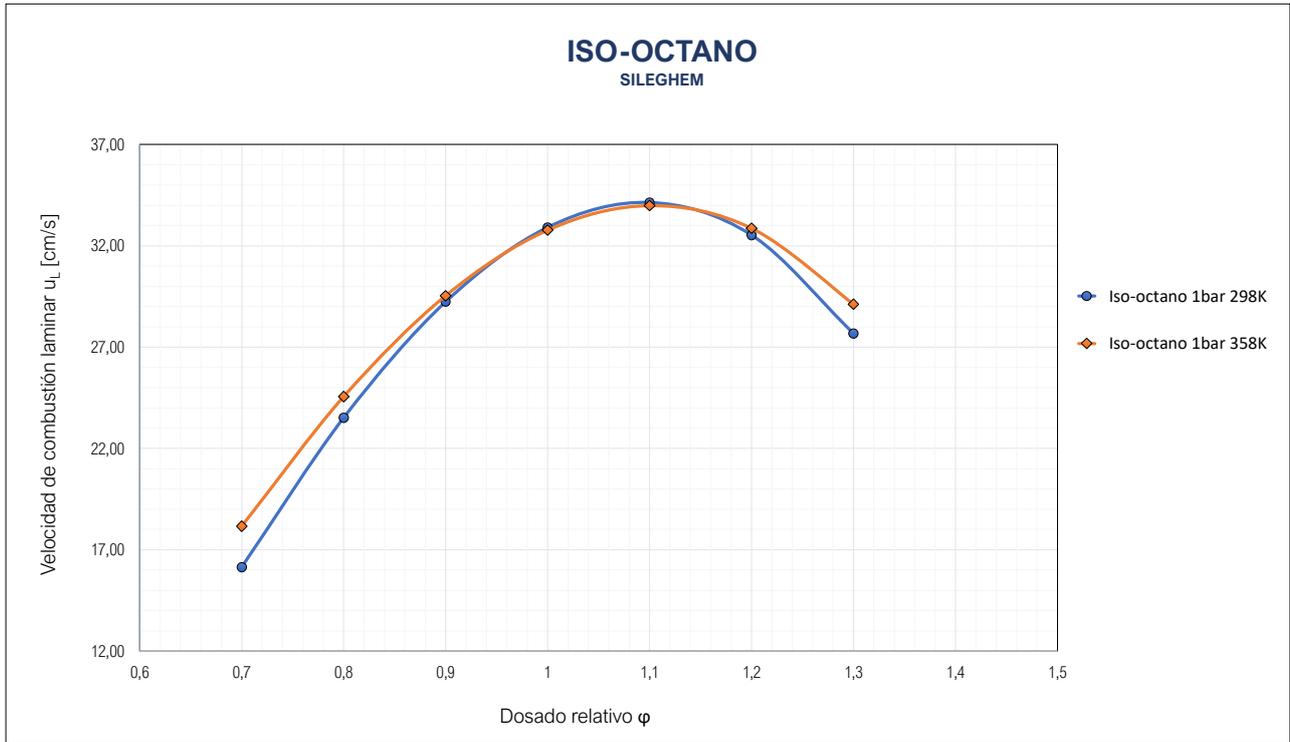
| PARÁMETROS DE GRÁFICA |                                 |
|-----------------------|---------------------------------|
| Dosado relativo       | Velocidad de combustión laminar |
| $\varphi$             | $u_L$                           |
| [unidimensional]      | cm/s                            |
| 0,7                   | 16,14                           |
| 0,8                   | 23,52                           |
| 0,9                   | 29,24                           |
| 1                     | 32,91                           |
| 1,1                   | 34,14                           |
| 1,2                   | 32,52                           |
| 1,3                   | 27,67                           |

### ISO-OCTANO 1 BAR 358 K

| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |             |                  |
|--------------------------|-------------|------------------|
| Presión                  | Temperatura | Dosado relativo  |
| $P$                      | $T$         | $\varphi$        |
| bar                      | K           | [unidimensional] |
| 1                        | 358         | 0,7              |
| 1                        | 358         | 0,8              |
| 1                        | 358         | 0,9              |
| 1                        | 358         | 1                |
| 1                        | 358         | 1,1              |
| 1                        | 358         | 1,2              |
| 1                        | 358         | 1,3              |

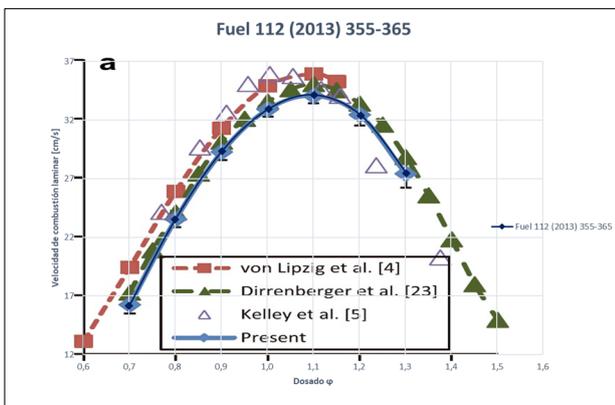
| PARÁMETROS DE GRÁFICA |                                 |
|-----------------------|---------------------------------|
| Dosado relativo       | Velocidad de combustión laminar |
| $\varphi$             | $u_L$                           |
| [unidimensional]      | cm/s                            |
| 0,7                   | 18,16                           |
| 0,8                   | 24,56                           |
| 0,9                   | 29,53                           |
| 1                     | 32,77                           |
| 1,1                   | 33,99                           |
| 1,2                   | 32,87                           |
| 1,3                   | 29,12                           |

## GRÁFICAS

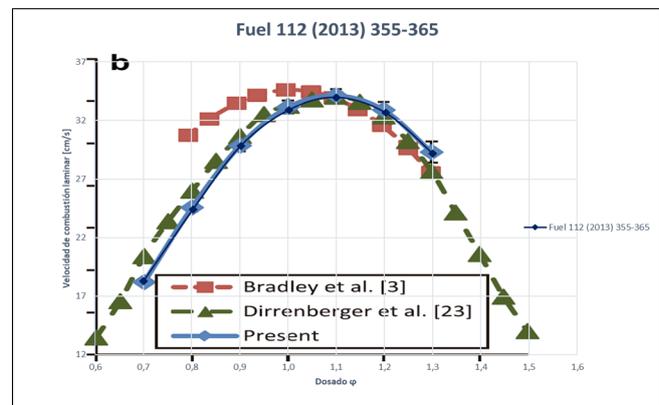


## GRÁFICA ARTÍCULO ORIGINAL

Iso-octano 298K



Iso-octano 358K



# N-HEPTANO

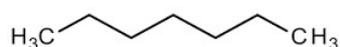
## HEYWOOD

## FUENTE BIBLIOGRÁFICA

|             |   |
|-------------|---|
| PUBLICACIÓN | INTERNAL COMBUSTION ENGINE FUNDAMENTALS, CAPÍTULO 9: COMBUSTION IN SPARK-IGNITION ENGINES   |
| AUTOR/ES    | JOHN B. HEYWOOD   |
| EDICIÓN     | MC GRAW HILL SERIES IN MECHANICAL ENGINEERING   |
| AÑO         | 1988  |
| ISSN/ISBN   | 978-1-26-011611-3   |
| ENLACE      | <a href="https://almena.uva.es/permalink/34BUC_UVA/eseo99/alma991003500659705774">https://almena.uva.es/permalink/34BUC_UVA/eseo99/alma991003500659705774</a> |
| PUBLICACIÓN | MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS, CAPÍTULO 18: COMBUSTIÓN EN MEP  |
| AUTOR/ES    | EDITORES LIBRO: J.M. DESANTES, F. PAYRI - AUTORES CAPÍTULO: F.V. TINAUT, J.J. LÓPEZ   |
| EDICIÓN     | EDITORIAL REVERTÉ, EDITORIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA  |
| AÑO         | 2011  |
| ISSN/ISBN   | 978-84-8363-705-0   |
| ENLACE      | <a href="https://almena.uva.es/permalink/34BUC_UVA/eseo99/alma991000535189705774">https://almena.uva.es/permalink/34BUC_UVA/eseo99/alma991000535189705774</a> |

## COMBUSTIBLE

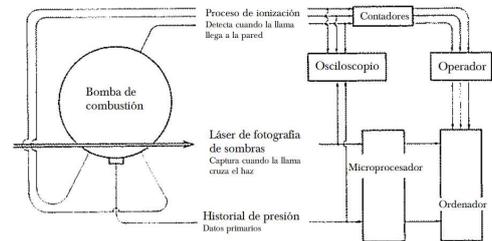
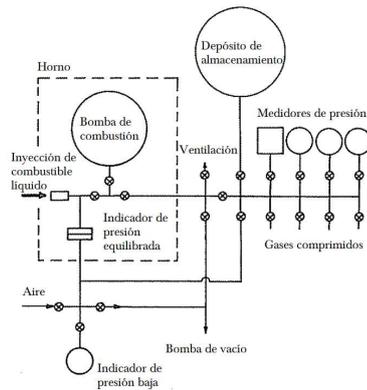
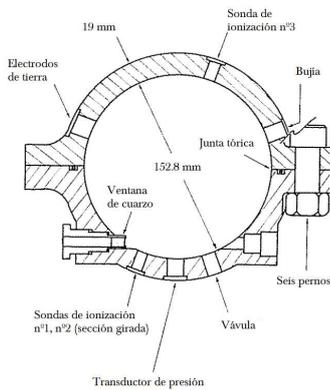
|                |   |
|----------------|---|
| TIPO           | N-HEPTANO (DERIVADO DE GASOLINA)  |
| NOMBRES        | IUPAC: N-HEPTANO. OTROS: NORMAL HEPTANO, DIPROPILMETANO   |
| FÓRMULAS       | HILL: C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> , QUÍMICA SEMIDESARROLLADA: CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>                                    |
| PROPIEDADES    | PUNTO DE EBULLICIÓN: 371,5K (98)°C, PUNTO DE FUSIÓN: 182,6K (-91°C), MASA MOLAR: 100,20 g/mol, DENSIDAD: 0,6838 g/cm <sup>3</sup> , OCTANAJE 0. LÍQUIDO INFLAMABLE, ISÓMERO DEL HEPTANO DE ALTA PUREZA (APROX. 99%) |
| F. ESTRUCTURAL |   |



# N-HEPTANO HEYWOOD

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

**MÉTODO** BOMBA DE COMBUSTIÓN ESFÉRICA CON IGNICIÓN CENTRAL  
**CLASIFICACIÓN** LLAMAS QUE SE PROPAGAN LIBREMENTE, BOMBA, MEDIDA DE LA PRESIÓN  
**INSTRUMENTAL** TRANSDUCTOR PIEZOELÉCTRICO KISTLER 603B1, AMPLIFICADOR 504A, MICROPROCESADOR ADAC 1000, OSCILOSCOPIO



## EXPRESIONES DE CÁLCULO

**CORRELACIÓN** METGHALCHI Y KECK  
**RANGO VALIDEZ** PRESIÓN: 1 BAR - 8 BAR, TEMPERATURA: 298K - 700K  
**C.REFERENCIA** PRESIÓN: 1 BAR - TEMPERATURA: 298K

| Presión en C.R. | Temperatura en C.R. |
|-----------------|---------------------|
| $p^0$           | $T^0$               |
| bar             | K                   |
| 1               | 298                 |

**EXP. PRINCIPAL**  $u_L [cm/s] = u_L^0 \cdot \left(\frac{T}{T^0}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{P}{P^0}\right)^\beta$

**EXP. AUXILIARES**  $u_L^0 [cm/s] = 39,0 - 129,6 \cdot (\varphi - 1,10)^2$

$\alpha = 1,89 - 0,55 \cdot (\varphi - 1)$

$\beta = -0,23 + 0,01 \cdot (\varphi - 1)$



## TABLAS DE DATOS

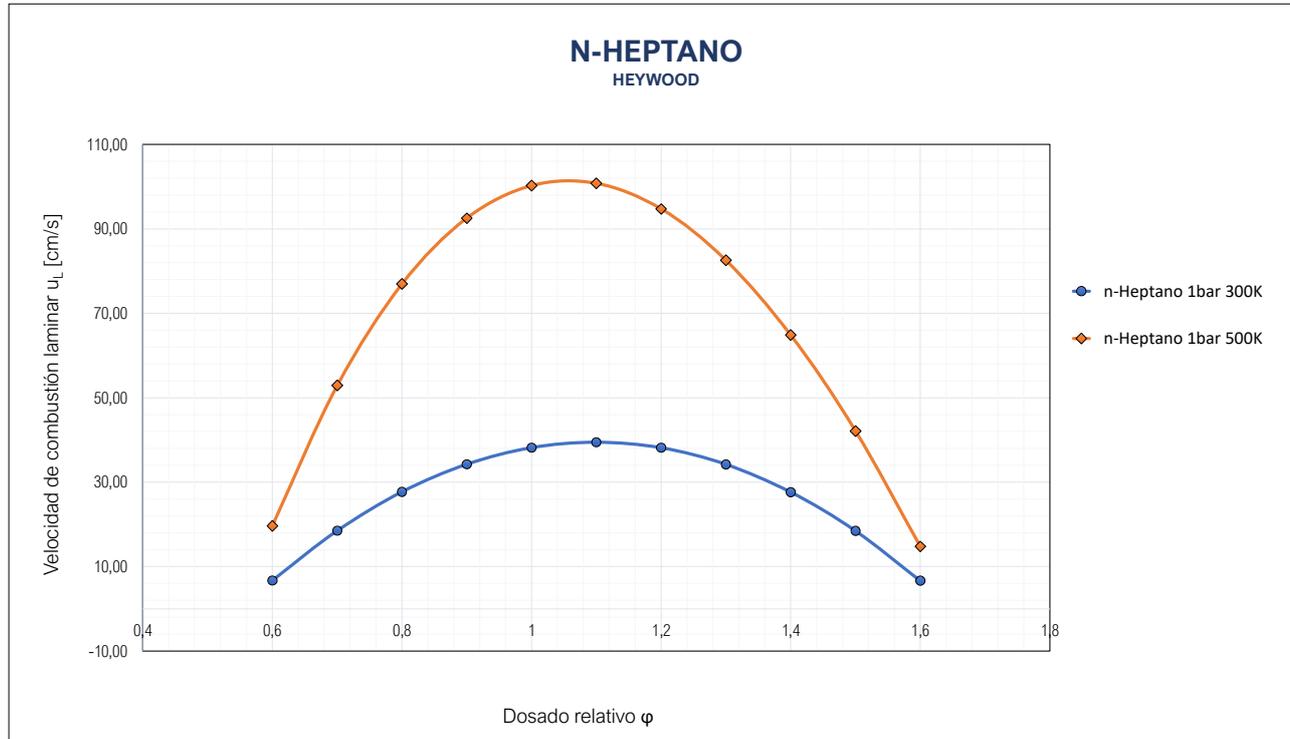
## N-HEPTANO 1 BAR 300 K

| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |             |                  | PARÁMETROS DE CÁLCULO                   |                          |                                    |                       |                                | PARÁMETROS DE GRÁFICA |                                 |
|--------------------------|-------------|------------------|---|--------------------------|------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Presión                  | Temperatura | Dosado relativo  | Velocidad de combustión laminar en C.R. | Relación de temperaturas | Coef. termodinámico de temperatura | Relación de presiones | Coef. termodinámico de presión | Dosado relativo       | Velocidad de combustión laminar |
| $P$                      | $T$         | $\varphi$        | $u_L^0$                                 | $T/T^0$                  | $\alpha$                           | $P/P^0$               | $\beta$                        | $\varphi$             | $u_L$                           |
| bar                      | K           | [unidimensional] | cm/s                                    | [unidimensional]         | [unidimensional]                   | [unidimensional]      | [unidimensional]               | [unidimensional]      | cm/s                            |
| 1                        | 300         | 0,6              | 6,60                                    | 1,01                     | 2,1100                             | 1,00                  | -0,2340                        | 0,6                   | 6,69                            |
| 1                        | 300         | 0,7              | 18,26                                   | 1,01                     | 2,0550                             | 1,00                  | -0,2330                        | 0,7                   | 18,52                           |
| 1                        | 300         | 0,8              | 27,34                                   | 1,01                     | 2,0000                             | 1,00                  | -0,2320                        | 0,8                   | 27,70                           |
| 1                        | 300         | 0,9              | 33,82                                   | 1,01                     | 1,9450                             | 1,00                  | -0,2310                        | 0,9                   | 34,26                           |
| 1                        | 300         | 1                | 37,70                                   | 1,01                     | 1,8900                             | 1,00                  | -0,2300                        | 1                     | 38,18                           |
| 1                        | 300         | 1,1              | 39,00                                   | 1,01                     | 1,8350                             | 1,00                  | -0,2290                        | 1,1                   | 39,48                           |
| 1                        | 300         | 1,2              | 37,70                                   | 1,01                     | 1,7800                             | 1,00                  | -0,2280                        | 1,2                   | 38,16                           |
| 1                        | 300         | 1,3              | 33,82                                   | 1,01                     | 1,7250                             | 1,00                  | -0,2270                        | 1,3                   | 34,21                           |
| 1                        | 300         | 1,4              | 27,34                                   | 1,01                     | 1,6700                             | 1,00                  | -0,2260                        | 1,4                   | 27,64                           |
| 1                        | 300         | 1,5              | 18,26                                   | 1,01                     | 1,6150                             | 1,00                  | -0,2250                        | 1,5                   | 18,46                           |
| 1                        | 300         | 1,6              | 6,60                                    | 1,01                     | 1,5600                             | 1,00                  | -0,2240                        | 1,6                   | 6,67                            |

## N-HEPTANO 1 BAR 500 K

| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |             |                  | PARÁMETROS DE CÁLCULO                   |                          |                                    |                       |                                | PARÁMETROS DE GRÁFICA |                                 |
|--------------------------|-------------|------------------|---|--------------------------|------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Presión                  | Temperatura | Dosado relativo  | Velocidad de combustión laminar en C.R. | Relación de temperaturas | Coef. termodinámico de temperatura | Relación de presiones | Coef. termodinámico de presión | Dosado relativo       | Velocidad de combustión laminar |
| $P$                      | $T$         | $\varphi$        | $u_L^0$                                 | $T/T^0$                  | $\alpha$                           | $P/P^0$               | $\beta$                        | $\varphi$             | $u_L$                           |
| bar                      | K           | [unidimensional] | cm/s                                    | [unidimensional]         | [unidimensional]                   | [unidimensional]      | [unidimensional]               | [unidimensional]      | cm/s                            |
| 1                        | 500         | 0,6              | 6,60                                    | 1,68                     | 2,1100                             | 1,00                  | -0,2340                        | 0,6                   | 19,67                           |
| 1                        | 500         | 0,7              | 18,26                                   | 1,68                     | 2,0550                             | 1,00                  | -0,2330                        | 0,7                   | 52,90                           |
| 1                        | 500         | 0,8              | 27,34                                   | 1,68                     | 2,0000                             | 1,00                  | -0,2320                        | 0,8                   | 76,96                           |
| 1                        | 500         | 0,9              | 33,82                                   | 1,68                     | 1,9450                             | 1,00                  | -0,2310                        | 0,9                   | 92,53                           |
| 1                        | 500         | 1                | 37,70                                   | 1,68                     | 1,8900                             | 1,00                  | -0,2300                        | 1                     | 100,27                          |
| 1                        | 500         | 1,1              | 39,00                                   | 1,68                     | 1,8350                             | 1,00                  | -0,2290                        | 1,1                   | 100,81                          |
| 1                        | 500         | 1,2              | 37,70                                   | 1,68                     | 1,7800                             | 1,00                  | -0,2280                        | 1,2                   | 94,72                           |
| 1                        | 500         | 1,3              | 33,82                                   | 1,68                     | 1,7250                             | 1,00                  | -0,2270                        | 1,3                   | 82,57                           |
| 1                        | 500         | 1,4              | 27,34                                   | 1,68                     | 1,6700                             | 1,00                  | -0,2260                        | 1,4                   | 64,87                           |
| 1                        | 500         | 1,5              | 18,26                                   | 1,68                     | 1,6150                             | 1,00                  | -0,2250                        | 1,5                   | 42,13                           |
| 1                        | 500         | 1,6              | 6,60                                    | 1,68                     | 1,5600                             | 1,00                  | -0,2240                        | 1,6                   | 14,80                           |

## GRÁFICAS





# N-HEPTANO

## SILEGHEM

## FUENTE BIBLIOGRÁFICA

|             |  |
|-------------|--|
| PUBLICACIÓN | LAMINAR BURNING VELOCITY OF GASOLINE AND THE GASOLINE SURROGATE COMPONENTS ISO-OCTANE, N-HEPTANE AND TOLUENE |
| AUTOR/ES    | L. SILEGHEM, V.A. ALEKSEEV, J. VANCOILLIE, K.M. VAN GEEM, E.J.K. NILSSON, S.VERHELST, A.A. KONNOV            |
| EDICIÓN     | ELSEVIER. REVISTA <i>FUEL</i> VOLUMEN 112, PÁGINAS 355-365   |
| AÑO         | 2013   |
| ISSN/ISBN   | 0016-2361  |
| ENLACE      | <a href="https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.049">https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.049</a>          |

## COMBUSTIBLE

|                |   |
|----------------|---|
| TIPO           | N-HEPTANO (DERIVADO DE GASOLINA)  |
| NOMBRES        | IUPAC: N-HEPTANO. OTROS: NORMAL HEPTANO, DIPROPILMETANO   |
| FÓRMULAS       | HILL: C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> , QUÍMICA SEMIDESARROLLADA: CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>                                    |
| PROPIEDADES    | PUNTO DE EBULLICIÓN: 371,5K (98)°C, PUNTO DE FUSIÓN: 182,6K (-91°C), MASA MOLAR: 100,20 g/mol, DENSIDAD: 0,6838 g/cm <sup>3</sup> , OCTANAJE 0. LÍQUIDO INFLAMABLE, ISÓMERO DEL HEPTANO DE ALTA PUREZA (APROX. 99%) |
| F. ESTRUCTURAL |   |



# N-HEPTANO

## SILEGHEM

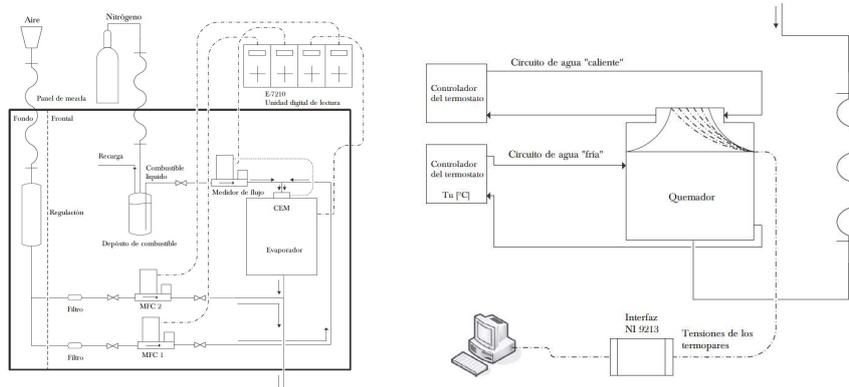
## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

**MÉTODO**  
**CLASIFICACIÓN**  
**INSTRUMENTAL**

FLUJO DE CALOR EN UN QUEMADOR DE PLACAS PERFORADAS

LLAMAS ESTACIONARIAS, QUEMADOR, LLAMA PLANA, CON CONTROL DEL FLUJO DE CALOR

PLACA DE QUEMADOR DE 2MM PERFORADA, CONTROLADOR DE FLUJO DE MASA LÍQUIDO CORI-FLOW (MFC), EVAPORADOR MEZCLADOR CONTROLADO (CEM)



## EXPRESIONES DE CÁLCULO

**CORRELACIÓN**  
**RANGO VALIDEZ**  
**C.REFERENCIA**

INTERPOLACIÓN POLINÓMICA DE GRÁFICAS EN ARTÍCULO  
 DOSADO RELATIVO: 0,7 - 1,3 TEMPERATURA: 298K - 358K  
 PRESIÓN: 1 BAR - TEMPERATURA: 298K

Presión en C.R.

Temperatura en C.R.

 $p^0$ 
 $T^0$ 

bar

K

1

298

**EXP. PRINCIPAL**

Para 298K:

$$u_L [cm/s] = -79,287 \cdot \varphi^3 + 113,05 \cdot \varphi^2 + 39,877 \cdot \varphi - 36,281$$

Para 358K:

$$u_L [cm/s] = -67,773 \cdot \varphi^3 + 43,678 \cdot \varphi^2 + 148,63 \cdot \varphi - 74,34$$



## TABLAS DE DATOS

### N-HEPTANO 1 BAR 298 K

| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |             |                  |
|--------------------------|-------------|------------------|
| Presión                  | Temperatura | Dosado relativo  |
| $P$                      | $T$         | $\varphi$        |
| bar                      | K           | [unidimensional] |
| 1                        | 298         | 0,7              |
| 1                        | 298         | 0,8              |
| 1                        | 298         | 0,9              |
| 1                        | 298         | 1                |
| 1                        | 298         | 1,1              |
| 1                        | 298         | 1,2              |
| 1                        | 298         | 1,3              |

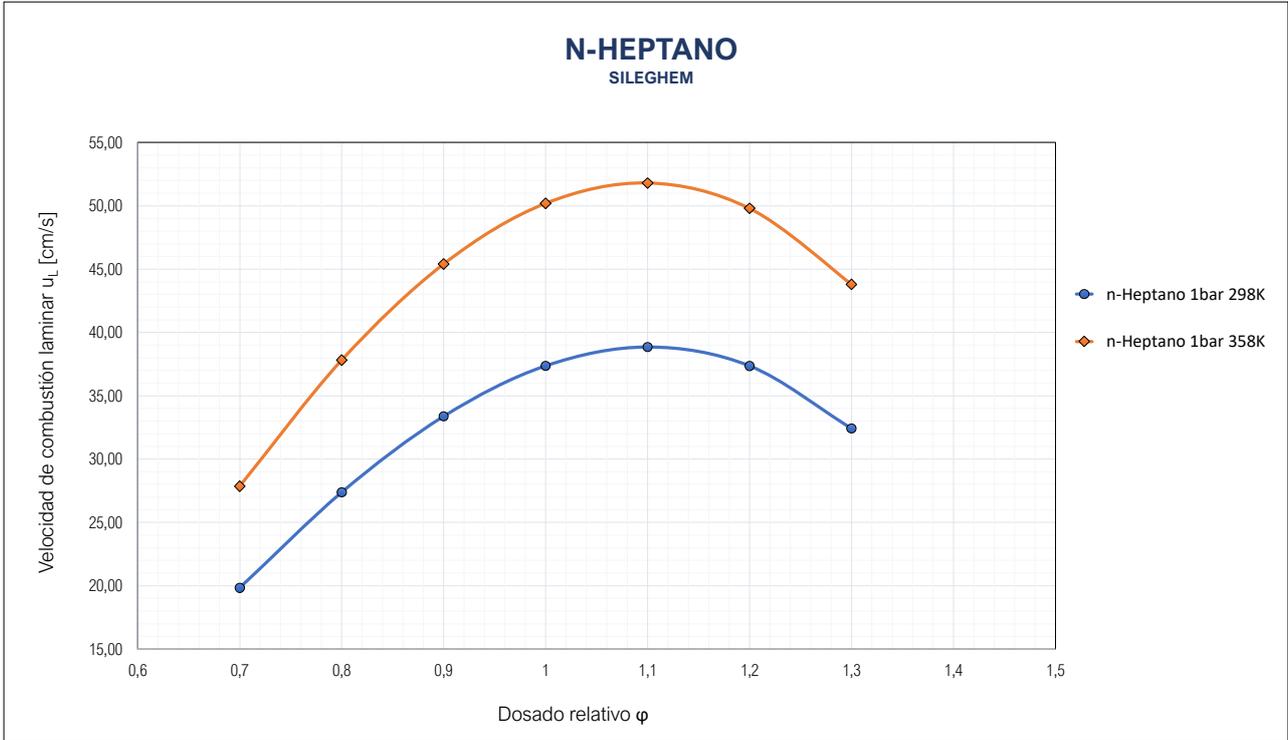
| PARÁMETROS DE GRÁFICA |                                 |
|-----------------------|---------------------------------|
| Dosado relativo       | Velocidad de combustión laminar |
| $\varphi$             | $u_L$                           |
| [unidimensional]      | cm/s                            |
| 0,7                   | 19,83                           |
| 0,8                   | 27,38                           |
| 0,9                   | 33,38                           |
| 1                     | 37,36                           |
| 1,1                   | 38,84                           |
| 1,2                   | 37,36                           |
| 1,3                   | 32,42                           |

### N-HEPTANO 1 BAR 358 K

| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |             |                  |
|--------------------------|-------------|------------------|
| Presión                  | Temperatura | Dosado relativo  |
| $P$                      | $T$         | $\varphi$        |
| bar                      | K           | [unidimensional] |
| 1                        | 358         | 0,7              |
| 1                        | 358         | 0,8              |
| 1                        | 358         | 0,9              |
| 1                        | 358         | 1                |
| 1                        | 358         | 1,1              |
| 1                        | 358         | 1,2              |
| 1                        | 358         | 1,3              |

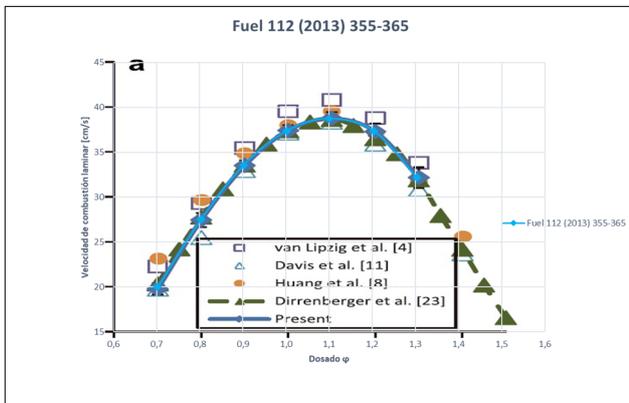
| PARÁMETROS DE GRÁFICA |                                 |
|-----------------------|---------------------------------|
| Dosado relativo       | Velocidad de combustión laminar |
| $\varphi$             | $u_L$                           |
| [unidimensional]      | cm/s                            |
| 0,7                   | 27,86                           |
| 0,8                   | 37,82                           |
| 0,9                   | 45,40                           |
| 1                     | 50,20                           |
| 1,1                   | 51,80                           |
| 1,2                   | 49,80                           |
| 1,3                   | 43,80                           |

# GRÁFICAS

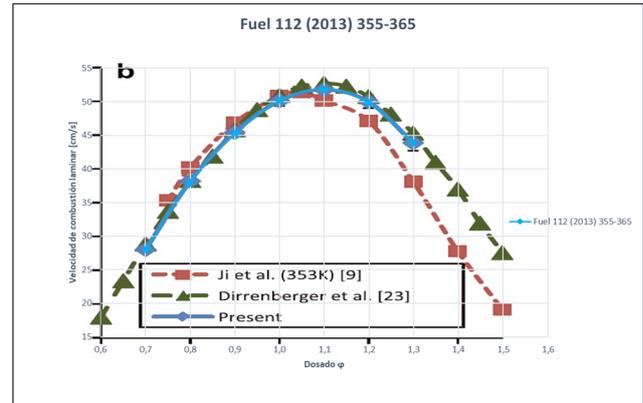


## GRÁFICA ARTÍCULO ORIGINAL

*n-Heptano 298K*



*n-Heptano 358K*





# TOLUENO

## HEYWOOD

## FUENTE BIBLIOGRÁFICA

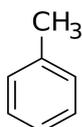
|             |   |
|-------------|---|
| PUBLICACIÓN | INTERNAL COMBUSTION ENGINE FUNDAMENTALS, CAPÍTULO 9: COMBUSTION IN SPARK-IGNITION ENGINES   |
| AUTOR/ES    | JOHN B. HEYWOOD   |
| EDICIÓN     | MC GRAW HILL SERIES IN MECHANICAL ENGINEERING   |
| AÑO         | 1988  |
| ISSN/ISBN   | 978-1-26-011611-3   |
| ENLACE      | <a href="https://almena.uva.es/permalink/34BUC_UVA/eseo99/alma991003500659705774">https://almena.uva.es/permalink/34BUC_UVA/eseo99/alma991003500659705774</a> |

|             |   |
|-------------|---|
| PUBLICACIÓN | MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS, CAPÍTULO 18: COMBUSTIÓN EN MEP  |
| AUTOR/ES    | EDITORES LIBRO: J.M. DESANTES, F. PAYRI - AUTORES CAPÍTULO: F.V. TINAUT, J.J. LÓPEZ   |
| EDICIÓN     | EDITORIAL REVERTÉ, EDITORIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA  |
| AÑO         | 2011  |
| ISSN/ISBN   | 978-84-8363-705-0   |
| ENLACE      | <a href="https://almena.uva.es/permalink/34BUC_UVA/eseo99/alma991000535189705774">https://almena.uva.es/permalink/34BUC_UVA/eseo99/alma991000535189705774</a> |

## COMBUSTIBLE

|             |  |
|-------------|--|
| TIPO        | TOLUENO (DERIVADO DE GASOLINA)   |
| NOMBRES     | IUPAC: 1-METIL-1,3,5-CICLOHEXATRIENOENCENO, METILBENCENO. OTROS: TOLUOL, METILBENZOL, FENILMETANO, METACIDA  |
| FÓRMULAS    | HILL: $C_7H_8$ , QUÍMICA SEMIDESARROLLADA: $C_6H_5CH_3$  |
| PROPIEDADES | PUNTO DE EBULLICIÓN: 383,8K (111)°C, PUNTO DE FUSIÓN: 178,2K (-95°C), MASA MOLAR: 92,1381 g/mol, DENSIDAD: 0,8669 g/cm <sup>3</sup> , OCTANAJE 114. LÍQUIDO INFLAMABLE, SE OBTIENE A PARTIR DEL BENCENO. |

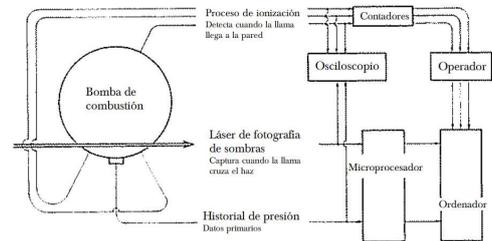
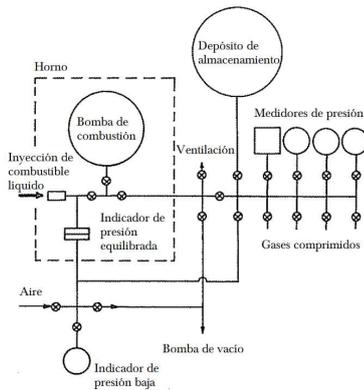
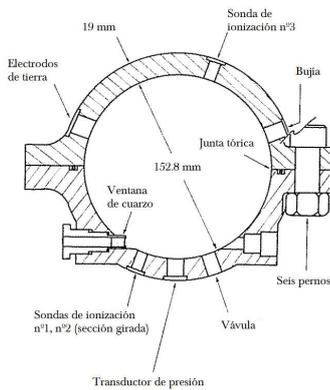
F. ESTRUCTURAL



# TOLUENO HEYWOOD

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

**MÉTODO** BOMBA DE COMBUSTIÓN ESFÉRICA CON IGNICIÓN CENTRAL  
**CLASIFICACIÓN** LLAMAS QUE SE PROPAGAN LIBREMENTE, BOMBA, MEDIDA DE LA PRESIÓN  
**INSTRUMENTAL** TRANSDUCTOR PIEZOELÉCTRICO KISTLER 603B1, AMPLIFICADOR 504A, MICROPROCESADOR ADAC 1000, OSCILOSCOPIO



## EXPRESIONES DE CÁLCULO

**CORRELACIÓN** METGHALCHI Y KECK  
**RANGO VALIDEZ** PRESIÓN: 1 BAR - 8 BAR, TEMPERATURA: 298K - 700K  
**C.REFERENCIA** PRESIÓN: 1 BAR - TEMPERATURA: 298K

| Presión en C.R. | Temperatura en C.R. |
|-----------------|---------------------|
| $p^0$           | $T^0$               |
| bar             | K                   |
| 1               | 298                 |

**EXP. PRINCIPAL**  $u_L [cm/s] = u_L^0 \cdot \left(\frac{T}{T^0}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{P}{P^0}\right)^\beta$

**EXP. AUXILIARES**  $u_L^0 [cm/s] = 31,0 - 150,1 \cdot (\varphi - 1,10)^2$

$\alpha = 1,66 - 3,34 \cdot (\varphi - 1)$

$\beta = -0,07 + 0,20 \cdot (\varphi - 1)$



## TABLAS DE DATOS

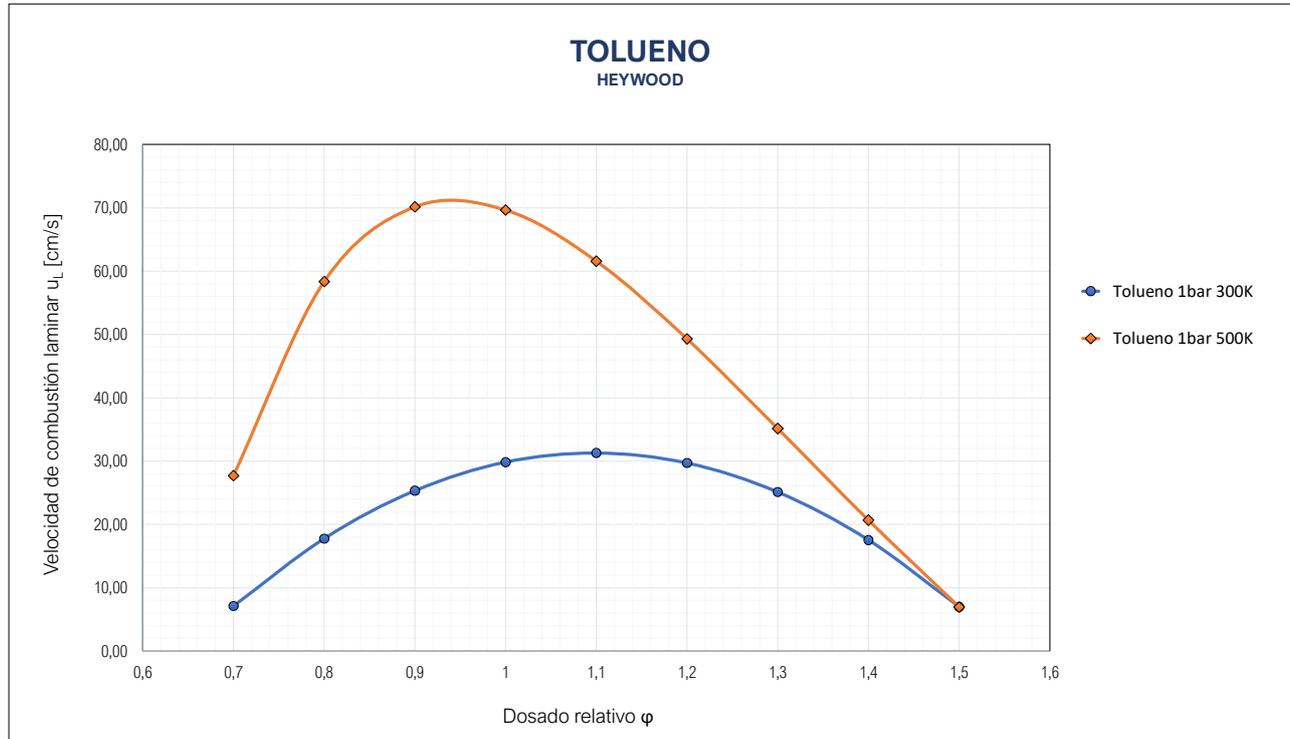
## TOLUENO 1 BAR 300 K

| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |             |                  | PARÁMETROS DE CÁLCULO                   |                          |                                    |                       |                                | PARÁMETROS DE GRÁFICA |                                 |
|--------------------------|-------------|------------------|---|--------------------------|------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Presión                  | Temperatura | Dosado relativo  | Velocidad de combustión laminar en C.R. | Relación de temperaturas | Coef. termodinámico de temperatura | Relación de presiones | Coef. termodinámico de presión | Dosado relativo       | Velocidad de combustión laminar |
| $P$                      | $T$         | $\varphi$        | $u_L^0$                                 | $T/T^0$                  | $\alpha$                           | $P/P^0$               | $\beta$                        | $\varphi$             | $u_L$                           |
| bar                      | K           | [unidimensional] | cm/s                                    | [unidimensional]         | [unidimensional]                   | [unidimensional]      | [unidimensional]               | [unidimensional]      | cm/s                            |
| 1                        | 300         | 0,7              | 6,98                                    | 1,01                     | 2,66                               | 1,00                  | -0,1300                        | 0,7                   | 7,11                            |
| 1                        | 300         | 0,8              | 17,49                                   | 1,01                     | 2,33                               | 1,00                  | -0,1100                        | 0,8                   | 17,77                           |
| 1                        | 300         | 0,9              | 25,00                                   | 1,01                     | 1,99                               | 1,00                  | -0,0900                        | 0,9                   | 25,33                           |
| 1                        | 300         | 1                | 29,50                                   | 1,01                     | 1,66                               | 1,00                  | -0,0700                        | 1                     | 29,83                           |
| 1                        | 300         | 1,1              | 31,00                                   | 1,01                     | 1,33                               | 1,00                  | -0,0500                        | 1,1                   | 31,28                           |
| 1                        | 300         | 1,2              | 29,50                                   | 1,01                     | 0,99                               | 1,00                  | -0,0300                        | 1,2                   | 29,70                           |
| 1                        | 300         | 1,3              | 25,00                                   | 1,01                     | 0,66                               | 1,00                  | -0,0100                        | 1,3                   | 25,11                           |
| 1                        | 300         | 1,4              | 17,49                                   | 1,01                     | 0,32                               | 1,00                  | 0,0100                         | 1,4                   | 17,53                           |
| 1                        | 300         | 1,5              | 6,98                                    | 1,01                     | -0,01                              | 1,00                  | 0,0300                         | 1,5                   | 6,98                            |

## TOLUENO 1 BAR 500 K

| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |             |                  | PARÁMETROS DE CÁLCULO                   |                          |                                    |                       |                                | PARÁMETROS DE GRÁFICA |                                 |
|--------------------------|-------------|------------------|---|--------------------------|------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Presión                  | Temperatura | Dosado relativo  | Velocidad de combustión laminar en C.R. | Relación de temperaturas | Coef. termodinámico de temperatura | Relación de presiones | Coef. termodinámico de presión | Dosado relativo       | Velocidad de combustión laminar |
| $P$                      | $T$         | $\varphi$        | $u_L^0$                                 | $T/T^0$                  | $\alpha$                           | $P/P^0$               | $\beta$                        | $\varphi$             | $u_L$                           |
| bar                      | K           | [unidimensional] | cm/s                                    | [unidimensional]         | [unidimensional]                   | [unidimensional]      | [unidimensional]               | [unidimensional]      | cm/s                            |
| 1                        | 500         | 0,7              | 6,98                                    | 1,68                     | 2,66                               | 1,00                  | -0,1300                        | 0,7                   | 27,69                           |
| 1                        | 500         | 0,8              | 17,49                                   | 1,68                     | 2,33                               | 1,00                  | -0,1100                        | 0,8                   | 58,35                           |
| 1                        | 500         | 0,9              | 25,00                                   | 1,68                     | 1,99                               | 1,00                  | -0,0900                        | 0,9                   | 70,15                           |
| 1                        | 500         | 1                | 29,50                                   | 1,68                     | 1,66                               | 1,00                  | -0,0700                        | 1                     | 69,65                           |
| 1                        | 500         | 1,1              | 31,00                                   | 1,68                     | 1,33                               | 1,00                  | -0,0500                        | 1,1                   | 61,57                           |
| 1                        | 500         | 1,2              | 29,50                                   | 1,68                     | 0,99                               | 1,00                  | -0,0300                        | 1,2                   | 49,29                           |
| 1                        | 500         | 1,3              | 25,00                                   | 1,68                     | 0,66                               | 1,00                  | -0,0100                        | 1,3                   | 35,14                           |
| 1                        | 500         | 1,4              | 17,49                                   | 1,68                     | 0,32                               | 1,00                  | 0,0100                         | 1,4                   | 20,68                           |
| 1                        | 500         | 1,5              | 6,98                                    | 1,68                     | -0,01                              | 1,00                  | 0,0300                         | 1,5                   | 6,95                            |

## GRÁFICAS





# TOLUENO

## SILEGHEM

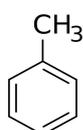
## FUENTE BIBLIOGRÁFICA

|             |  |
|-------------|--|
| PUBLICACIÓN | LAMINAR BURNING VELOCITY OF GASOLINE AND THE GASOLINE SURROGATE COMPONENTS ISO-OCTANE, N-HEPTANE AND TOLUENE |
| AUTOR/ES    | L. SILEGHEM, V.A. ALEKSEEV, J. VANCOILLIE, K.M. VAN GEEM, E.J.K. NILSSON, S.VERHELST, A.A. KONNOV            |
| EDICIÓN     | ELSEVIER. REVISTA <i>FUEL</i> VOLUMEN 112, PÁGINAS 355-365   |
| AÑO         | 2013   |
| ISSN/ISBN   | 0016-2361  |
| ENLACE      | <a href="https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.049">https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.049</a>          |

## COMBUSTIBLE

|             |  |
|-------------|--|
| TIPO        | TOLUENO (DERIVADO DE GASOLINA)   |
| NOMBRES     | IUPAC: 1-METIL-1,3,5-CICLOHEXATRIENOENCENO, METILBENCENO. OTROS: TOLUOL, METILBENZOL, FENILMETANO, METACIDA  |
| FÓRMULAS    | HILL: C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> , QUÍMICA SEMIDESARROLLADA: C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>  |
| PROPIEDADES | PUNTO DE EBULLICIÓN: 383,8K (111)°C, PUNTO DE FUSIÓN: 178,2K (-95°C), MASA MOLAR: 92,1381 g/mol, DENSIDAD: 0,8669 g/cm <sup>3</sup> , OCTANAJE 114. LÍQUIDO INFLAMABLE, SE OBTIENE A PARTIR DEL BENCENO. |

F. ESTRUCTURAL



# TOLUENO

## SILEGHEM

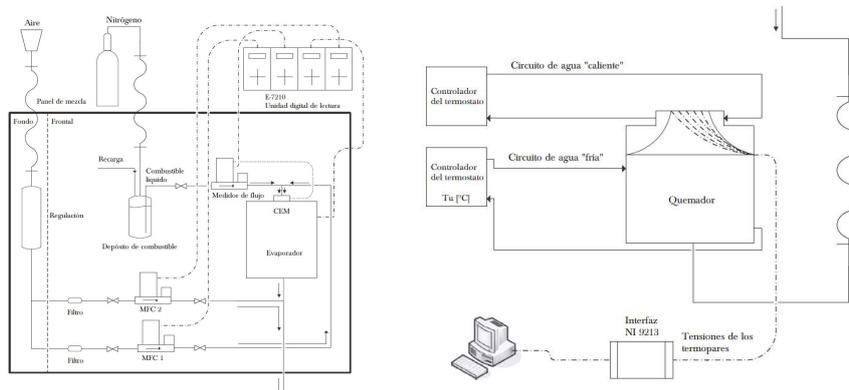
## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

**MÉTODO**  
**CLASIFICACIÓN**  
**INSTRUMENTAL**

FLUJO DE CALOR EN UN QUEMADOR DE PLACAS PERFORADAS

LLAMAS ESTACIONARIAS, QUEMADOR, LLAMA PLANA, CON CONTROL DEL FLUJO DE CALOR

PLACA DE QUEMADOR DE 2MM PERFORADA, CONTROLADOR DE FLUJO DE MASA LÍQUIDO CORI-FLOW (MFC), EVAPORADOR MEZCLADOR CONTROLADO (CEM)



## EXPRESIONES DE CÁLCULO

**CORRELACIÓN**  
**RANGO VALIDEZ**  
**C.REFERENCIA**

INTERPOLACIÓN POLINÓMICA DE GRÁFICAS EN ARTÍCULO  
 DOSADO RELATIVO: 0,7 - 1,3 TEMPERATURA: 298K - 358K  
 PRESIÓN: 1 BAR - TEMPERATURA: 298K

Presión en C.R.

Temperatura en C.R.

 $p^0$ 
 $T^0$ 

bar

K

1

298

**EXP. PRINCIPAL**

Para 298K:

$$u_L [cm/s] = -48,294 \cdot \varphi^3 + 25,721 \cdot \varphi^2 + 112,83 \cdot \varphi - 56,03$$

Para 358K:

$$u_L [cm/s] = -48,305 \cdot \varphi^3 + 8,9392 \cdot \varphi^2 + 150,52 \cdot \varphi - 65,379$$



## TABLAS DE DATOS

### TOLUENO 1 BAR 298 K

| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |             |                  |
|--------------------------|-------------|------------------|
| Presión                  | Temperatura | Dosado relativo  |
| $P$                      | $T$         | $\varphi$        |
| bar                      | K           | [unidimensional] |
| 1                        | 298         | 0,7              |
| 1                        | 298         | 0,8              |
| 1                        | 298         | 0,9              |
| 1                        | 298         | 1                |
| 1                        | 298         | 1,1              |
| 1                        | 298         | 1,2              |
| 1                        | 298         | 1,3              |

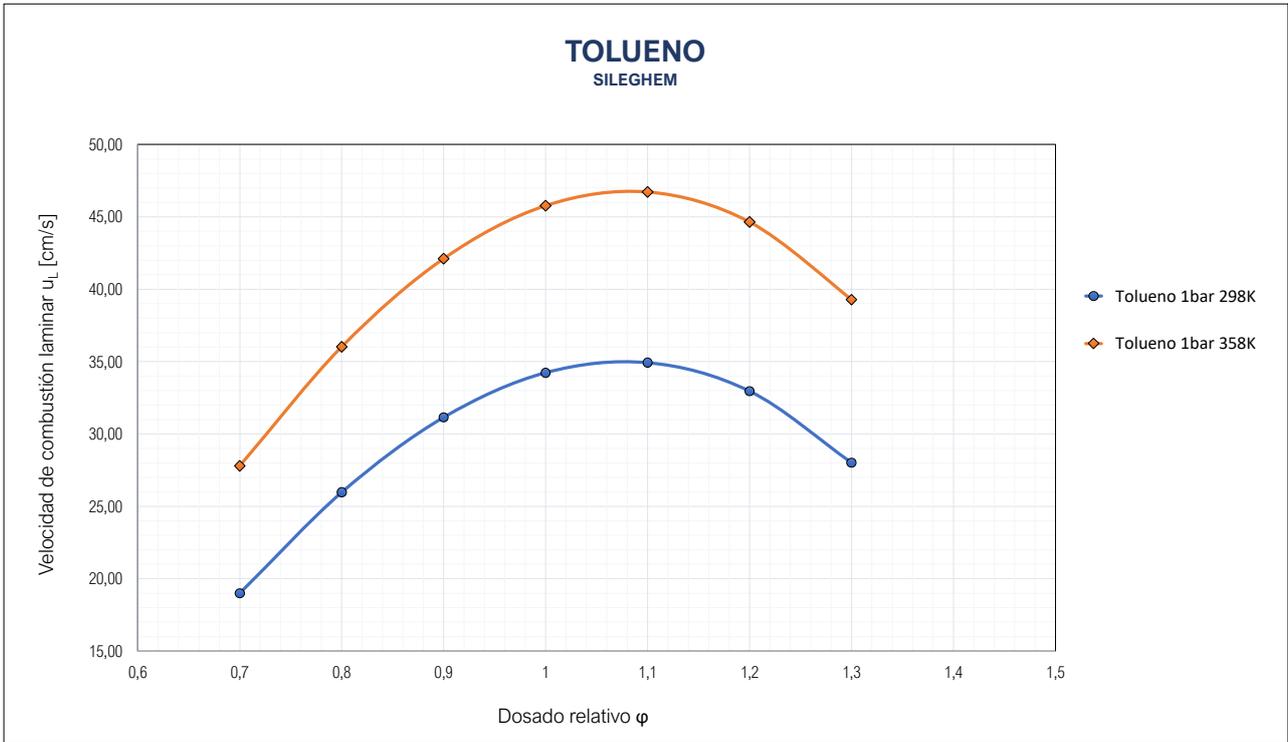
| PARÁMETROS DE GRÁFICA |                                 |
|-----------------------|---------------------------------|
| Dosado relativo       | Velocidad de combustión laminar |
| $\varphi$             | $u_L$                           |
| [unidimensional]      | cm/s                            |
| 0,7                   | 18,99                           |
| 0,8                   | 25,97                           |
| 0,9                   | 31,14                           |
| 1                     | 34,23                           |
| 1,1                   | 34,93                           |
| 1,2                   | 32,95                           |
| 1,3                   | 28,02                           |

### TOLUENO 1 BAR 358 K

| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |             |                  |
|--------------------------|-------------|------------------|
| Presión                  | Temperatura | Dosado relativo  |
| $P$                      | $T$         | $\varphi$        |
| bar                      | K           | [unidimensional] |
| 1                        | 358         | 0,7              |
| 1                        | 358         | 0,8              |
| 1                        | 358         | 0,9              |
| 1                        | 358         | 1                |
| 1                        | 358         | 1,1              |
| 1                        | 358         | 1,2              |
| 1                        | 358         | 1,3              |

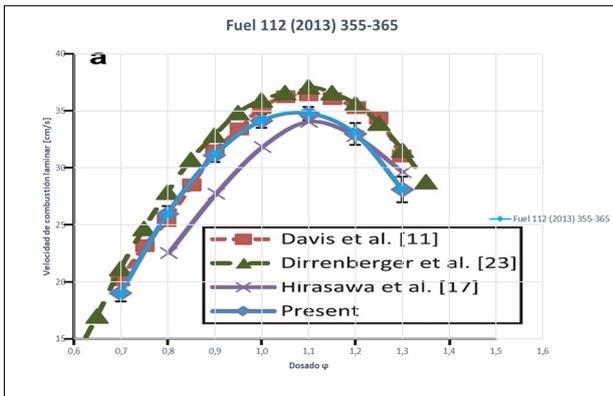
| PARÁMETROS DE GRÁFICA |                                 |
|-----------------------|---------------------------------|
| Dosado relativo       | Velocidad de combustión laminar |
| $\varphi$             | $u_L$                           |
| [unidimensional]      | cm/s                            |
| 0,7                   | 27,80                           |
| 0,8                   | 36,03                           |
| 0,9                   | 42,12                           |
| 1                     | 45,78                           |
| 1,1                   | 46,72                           |
| 1,2                   | 44,65                           |
| 1,3                   | 39,28                           |

## GRÁFICAS

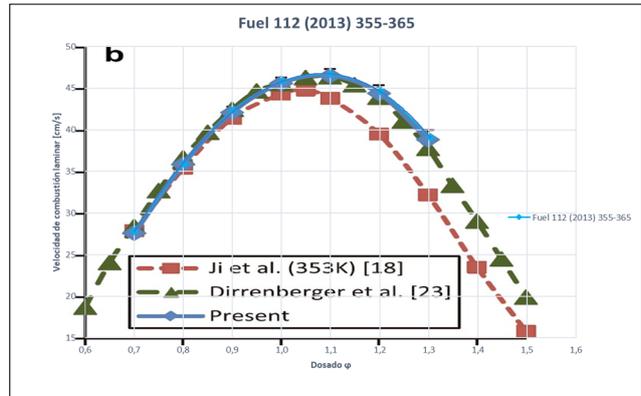


## GRÁFICA ARTÍCULO ORIGINAL

Tolueno 298K



Tolueno 358K





# METANO

## REYES

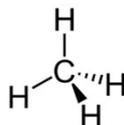
## FUENTE BIBLIOGRÁFICA

|             |   |
|-------------|---|
| PUBLICACIÓN | EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF BURNING VELOCITIES OF PREMIXED METHANE-AIR AND HYDROGEN-AIR MIXTURES IN A CONSTANT VOLUME COMBUSTION BOMB AT MODERATE PRESSURE AND TEMPERATURA |
| AUTOR/ES    | M.REYES, F.V.TINAUT, A.HORNILLO, A.LAFUENTE   |
| EDICIÓN     | ELSEVIER. REVISTA <i>APPLIED THERMAL ENGINEERING</i> VOLUMEN 130, PÁGINAS 684-697   |
| AÑO         | 2018  |
| ISSN/ISBN   | 1359-4311   |
| ENLACE      | <a href="https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.165">https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.165</a>   |

## COMBUSTIBLE

|             |   |
|-------------|---|
| TIPO        | METANO (REPRESENTATIVO DE GAS NATURAL)  |
| NOMBRES     | IUPAC: METANO. OTROS: TETRAHIDRURO DE CARBONO, HIDRURO DE METILO, GAS DEL PANTANO   |
| FÓRMULAS    | HILL: CH <sub>4</sub>   |
| PROPIEDADES | PUNTO DE EBULLICIÓN: 111,65K (-162°C), PUNTO DE FUSIÓN: 90,7K (-182°C), MASA MOLAR: 16,04 g/mol, DENSIDAD: 0,657 g/cm <sup>3</sup> , OCTANAJE 120. HIDROCARBURO ALCANO MÁS SENCILLO. GAS DE EFECTO INVERNADERO, INCOLORO. |

### F. ESTRUCTURAL

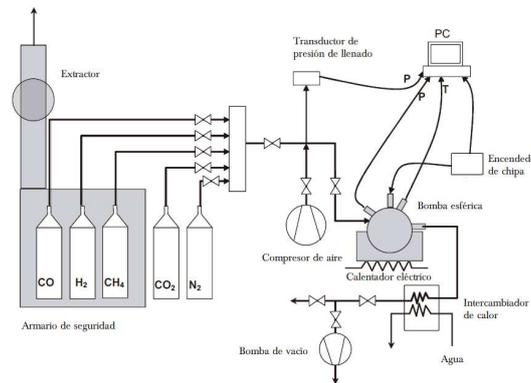


# METANO REYES

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

**MÉTODO**  
**CLASIFICACIÓN**  
**INSTRUMENTAL**

BOMBA DE COMBUSTIÓN ESFÉRICA A VOLUMEN CONSTANTE  
 LLAMAS QUE SE PROPAGAN LIBREMENTE, BOMBA, MEDIDA DE LA PRESIÓN  
 TRANSDUCTOR PIEZOELÉCTRICO KISTLER 7063, AMPLIFICADOR kistler 5018A1000, MICROPROCESADOR ADAC YOKOGAWA DL750 SCOPECORDER (16 BITS)



## EXPRESIONES DE CÁLCULO

**CORRELACIÓN**  
**RANGO VALIDEZ**  
**C.REFERENCIA**

METGHALCHI Y KECK  
 PRESIÓN: 1 BAR - 7 BAR, TEMPERATURA: 300K - 480K  
 PRESIÓN: 1 BAR - TEMPERATURA: 300K

| Presión en C.R. | Temperatura en C.R. |
|-----------------|---------------------|
| $p^0$           | $T^0$               |
| bar             | K                   |
| 1               | 300                 |

**EXP. PRINCIPAL**

$$u_L [cm/s] = u_L^0 \cdot \left(\frac{T}{T^0}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{P}{P^0}\right)^\beta$$

**EXP. AUXILIARES**

$$u_L^0 [cm/s] = 35,5 - 165,0 \cdot (\varphi - 1,05)^2$$

$$\alpha = 1,894 - 0,0202 \cdot (\varphi - 1)$$

$$\beta = -0,358 - 0,050 \cdot (\varphi - 1)$$



## TABLAS DE DATOS

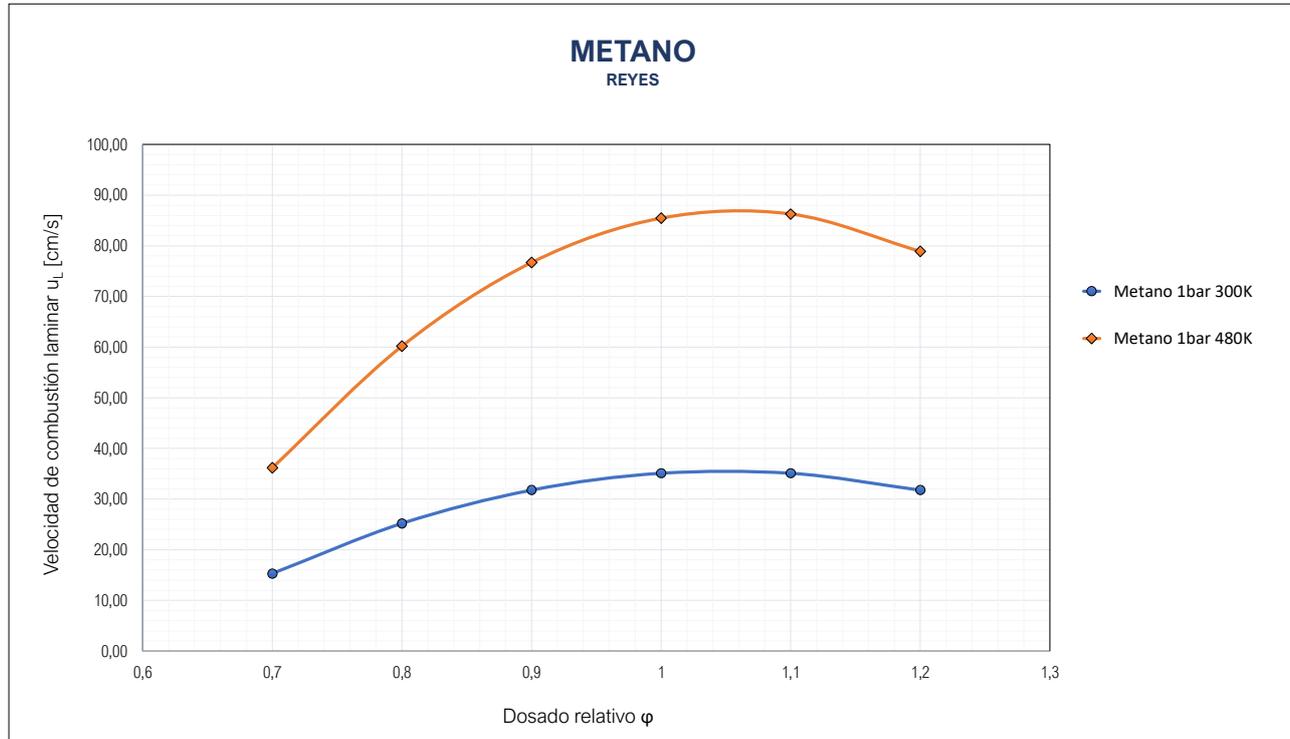
## METANO 10 BAR 300 K

| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |             |                  | PARÁMETROS DE CÁLCULO                   |                          |                                    |                       |                                | PARÁMETROS DE GRÁFICA |                                 |
|--------------------------|-------------|------------------|---|--------------------------|------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Presión                  | Temperatura | Dosado relativo  | Velocidad de combustión laminar en C.R. | Relación de temperaturas | Coef. termodinámico de temperatura | Relación de presiones | Coef. termodinámico de presión | Dosado relativo       | Velocidad de combustión laminar |
| $P$                      | $T$         | $\varphi$        | $u_L^0$                                 | $T/T^0$                  | $\alpha$                           | $P/P^0$               | $\beta$                        | $\varphi$             | $u_L$                           |
| bar                      | K           | [unidimensional] | cm/s                                    | [unidimensional]         | [unidimensional]                   | [unidimensional]      | [unidimensional]               | [unidimensional]      | cm/s                            |
| 1                        | 300         | 0,7              | 15,29                                   | 1,00                     | 1,83                               | 1,00                  | -0,34                          | 0,7                   | 15,29                           |
| 1                        | 300         | 0,8              | 25,19                                   | 1,00                     | 1,85                               | 1,00                  | -0,35                          | 0,8                   | 25,19                           |
| 1                        | 300         | 0,9              | 31,79                                   | 1,00                     | 1,87                               | 1,00                  | -0,35                          | 0,9                   | 31,79                           |
| 1                        | 300         | 1                | 35,09                                   | 1,00                     | 1,89                               | 1,00                  | -0,36                          | 1                     | 35,09                           |
| 1                        | 300         | 1,1              | 35,09                                   | 1,00                     | 1,91                               | 1,00                  | -0,36                          | 1,1                   | 35,09                           |
| 1                        | 300         | 1,2              | 31,79                                   | 1,00                     | 1,93                               | 1,00                  | -0,37                          | 1,2                   | 31,79                           |

## METANO 10 BAR 480 K

| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |             |                  | PARÁMETROS DE CÁLCULO                   |                          |                                    |                       |                                | PARÁMETROS DE GRÁFICA |                                 |
|--------------------------|-------------|------------------|---|--------------------------|------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Presión                  | Temperatura | Dosado relativo  | Velocidad de combustión laminar en C.R. | Relación de temperaturas | Coef. termodinámico de temperatura | Relación de presiones | Coef. termodinámico de presión | Dosado relativo       | Velocidad de combustión laminar |
| $P$                      | $T$         | $\varphi$        | $u_L^0$                                 | $T/T^0$                  | $\alpha$                           | $P/P^0$               | $\beta$                        | $\varphi$             | $u_L$                           |
| bar                      | K           | [unidimensional] | cm/s                                    | [unidimensional]         | [unidimensional]                   | [unidimensional]      | [unidimensional]               | [unidimensional]      | cm/s                            |
| 1                        | 480         | 0,7              | 15,29                                   | 1,60                     | 1,83                               | 1,00                  | -0,34                          | 0,7                   | 36,19                           |
| 1                        | 480         | 0,8              | 25,19                                   | 1,60                     | 1,85                               | 1,00                  | -0,35                          | 0,8                   | 60,19                           |
| 1                        | 480         | 0,9              | 31,79                                   | 1,60                     | 1,87                               | 1,00                  | -0,35                          | 0,9                   | 76,69                           |
| 1                        | 480         | 1                | 35,09                                   | 1,60                     | 1,89                               | 1,00                  | -0,36                          | 1                     | 85,46                           |
| 1                        | 480         | 1,1              | 35,09                                   | 1,60                     | 1,91                               | 1,00                  | -0,36                          | 1,1                   | 86,27                           |
| 1                        | 480         | 1,2              | 31,79                                   | 1,60                     | 1,93                               | 1,00                  | -0,37                          | 1,2                   | 78,91                           |

## GRÁFICAS





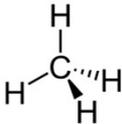
# METANO

## BOUGRINE

## FUENTE BIBLIOGRÁFICA

|             |  |
|-------------|--|
| PUBLICACIÓN | ON THE COMBINATION OF COMPLEX CHEMISTRY WITH A 0-D COHERENT FLAME MODEL TO ACCOUNT FOR THE FUEL PROPERTIES IN SPARK IGNITION ENGINES SIMULATIONS: APPLICATION TO METHANE-AIR-DILUENTS MIXTURES |
| AUTOR/ES    | S.BOUGRINE, S.RICHARD, D.VEYNANTE  |
| EDICIÓN     | ELSEVIER. REVISTA <i>INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY</i> VOLUMEN 36, PÁGINAS 12035-12047  |
| AÑO         | 2011   |
| ISSN/ISBN   | 3603199  |
| ENLACE      | <a href="https://doi.org/10.1016/j.proci.2010.06.017">https://doi.org/10.1016/j.proci.2010.06.017</a>  |

## COMBUSTIBLE

|                |   |
|----------------|---|
| TIPO           | METANO (REPRESENTATIVO DE GAS NATURAL)  |
| NOMBRES        | IUPAC: METANO. OTROS: TETRAHIDRURO DE CARBONO, HIDRURO DE METILO, GAS DEL PANTANO   |
| FÓRMULAS       | HILL: CH <sub>4</sub>   |
| PROPIEDADES    | PUNTO DE EBULLICIÓN: 111,65K (-162°C), PUNTO DE FUSIÓN: 90,7K (-182°C), MASA MOLAR: 16,04 g/mol, DENSIDAD: 0,657 g/cm <sup>3</sup> , OCTANAJE 120. HIDROCARBURO ALCANO MÁS SENCILLO. GAS DE EFECTO INVERNADERO, INCOLORO. |
| F. ESTRUCTURAL |    |



# METANO

## BOUGRINE

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### MÉTODO FUNDAMENTO HIPÓTESIS

MODELO DE COMBUSTIÓN CFM1D

EVALUACIÓN DE LAS REACCIONES QUÍMICAS DE OXIDACIÓN QUE SE PRODUCEN EN EL FRENTE DE LLAMA

- MEZCLA DE 12 ESPECIES: COMBUSTIBLE, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub>, NO, HIDROCARBUROS SIN QUEMAR (UHC, O, H, OH), CONSIDERADO COMO UN GAS IDEAL
- LA COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA SE CONSIDERA HOMOGÉNEA EN CADA ZONA (GASES FRESCOS Y QUEMADOS)
- SE SUPONE PRESIÓN IDÉNTICA EN AMBAS ZONAS
- CADA ZONA SE DESCRIBE POR SU MASA, VOLUMEN, COMPOSICIÓN Y TEMPERATURA
- SE SUPONE QUE EL CAMPO DE ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTO ES UNIFORME EN EL CILINDRO

## EXPRESIONES DE CÁLCULO

### CORRELACIÓN RANGO VALIDEZ

METGHALCHI Y KECK

PRESIÓN: 1 BAR - 110 BAR, TEMPERATURA: 0 K - 950 K

DOSADO: 0,6-1,3

### C.REFERENCIA

PRESIÓN: 1 BAR - TEMPERATURA: 300K

### EXP. PRINCIPAL

$$u_L [cm/s] = u_L^0 \cdot \left(\frac{T}{T^0}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{P}{P^0}\right)^\beta$$

### EXP. AUXILIARES

$$u_L^0 [cm/s] = a_0 \varphi^{a_1} \cdot e^{a_2(\varphi+a_3)^2}$$

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 \varphi + \alpha_2 \varphi^4 + \alpha_3 \left(\frac{T^0}{T}\right)^2 \cdot \varphi^2$$

$$\beta = \beta_0 + \beta_1 \varphi + \beta_2 \varphi^4 + \beta_3 \left(\frac{T^0}{T}\right) \cdot \left(\frac{P^0}{P}\right) \cdot \varphi^2$$

Presión en C.R.

Temperatura en C.R.

 $P^0$  $T^0$ 

bar

K

1

300

|            |          |           |              |
|------------|----------|-----------|--------------|
| $a_0$      | 150,8168 | $\beta_0$ | -0,5406      |
| $a_1$      | 4,5386   | $\beta_1$ | 0,1347       |
| $a_2$      | -2,4481  | $\beta_2$ | -0,0125      |
| $a_3$      | -0,2248  | $\beta_3$ | 2,2891E - 04 |
| $\alpha_0$ | 3,2466   |           |              |
| $\alpha_1$ | -1,0709  |           |              |
| $\alpha_2$ | 0,1517   |           |              |
| $\alpha_3$ | -1,0359  |           |              |



## TABLAS DE DATOS

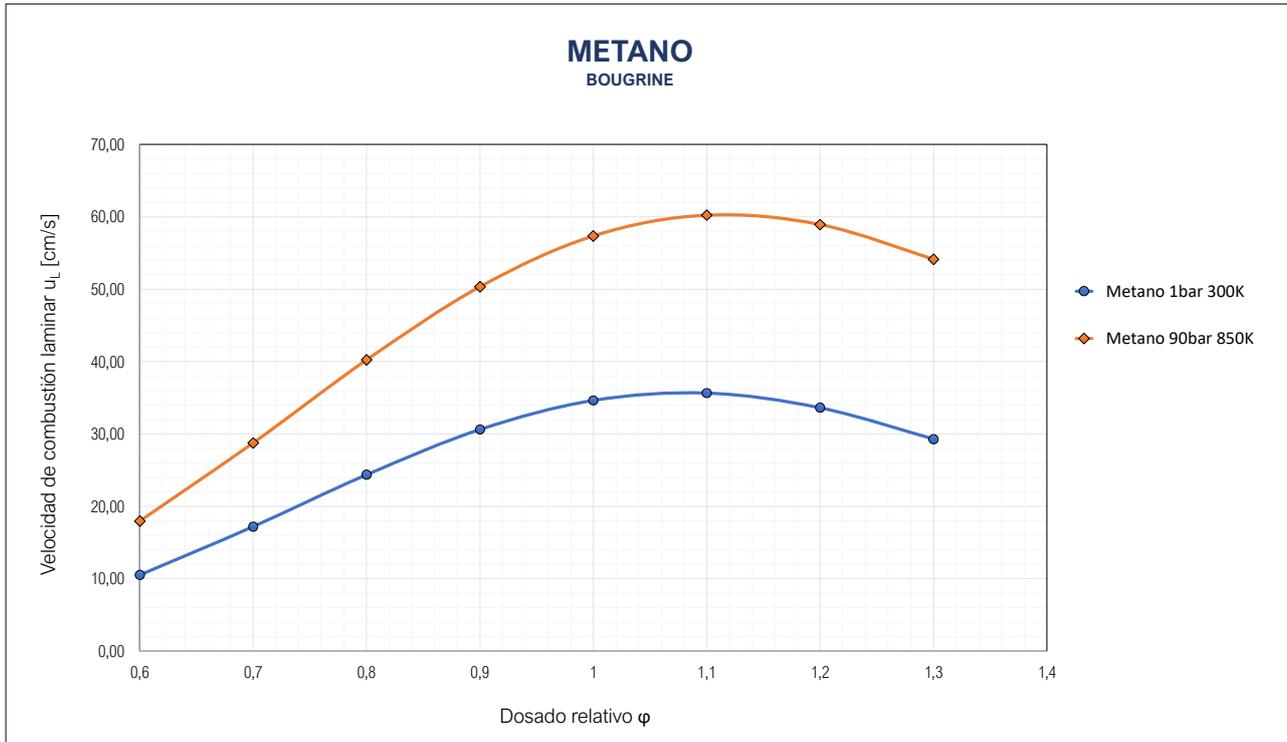
## METANO 1 BAR 300 K

| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |             |                  | PARÁMETROS DE CÁLCULO                   |                          |                                    |                       |                                | PARÁMETROS DE GRÁFICA |                                 |
|--------------------------|-------------|------------------|---|--------------------------|------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Presión                  | Temperatura | Dosado relativo  | Velocidad de combustión laminar en C.R. | Relación de temperaturas | Coef. termodinámico de temperatura | Relación de presiones | Coef. termodinámico de presión | Dosado relativo       | Velocidad de combustión laminar |
| $P$                      | $T$         | $\varphi$        | $u_L^0$                                 | $T/T^0$                  | $\alpha$                           | $P/P^0$               | $\beta$                        | $\varphi$             | $u_L$                           |
| bar                      | K           | [unidimensional] | cm/s                                    | [unidimensional]         | [unidimensional]                   | [unidimensional]      | [unidimensional]               | [unidimensional]      | cm/s                            |
| 1                        | 300         | 0,6              | 10,52                                   | 1,00                     | 2,2508                             | 1,00                  | -0,4613                        | 0,6                   | 10,52                           |
| 1                        | 300         | 0,7              | 17,19                                   | 1,00                     | 2,0258                             | 1,00                  | -0,4492                        | 0,7                   | 17,19                           |
| 1                        | 300         | 0,8              | 24,37                                   | 1,00                     | 1,7890                             | 1,00                  | -0,4378                        | 0,8                   | 24,37                           |
| 1                        | 300         | 0,9              | 30,62                                   | 1,00                     | 1,5432                             | 1,00                  | -0,4274                        | 0,9                   | 30,62                           |
| 1                        | 300         | 1                | 34,64                                   | 1,00                     | 1,2915                             | 1,00                  | -0,4182                        | 1                     | 34,64                           |
| 1                        | 300         | 1,1              | 35,64                                   | 1,00                     | 1,0373                             | 1,00                  | -0,4105                        | 1,1                   | 35,64                           |
| 1                        | 300         | 1,2              | 33,63                                   | 1,00                     | 0,7844                             | 1,00                  | -0,4046                        | 1,2                   | 33,63                           |
| 1                        | 300         | 1,3              | 29,27                                   | 1,00                     | 0,5370                             | 1,00                  | -0,4008                        | 1,3                   | 29,27                           |

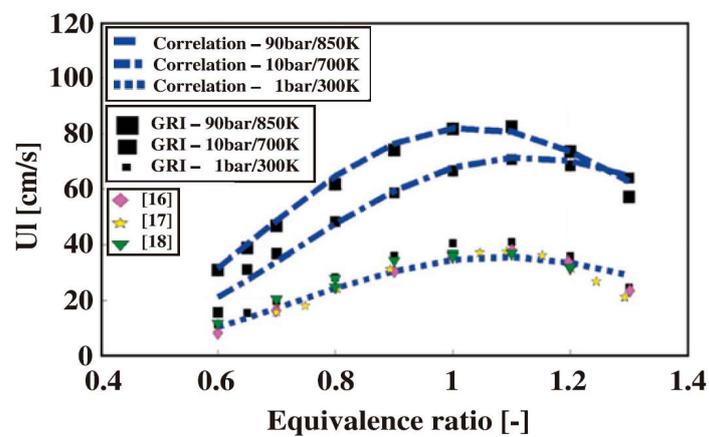
## METANO 90 BAR 850 K

| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |             |                  | PARÁMETROS DE CÁLCULO                   |                          |                                    |                       |                                | PARÁMETROS DE GRÁFICA |                                 |
|--------------------------|-------------|------------------|---|--------------------------|------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Presión                  | Temperatura | Dosado relativo  | Velocidad de combustión laminar en C.R. | Relación de temperaturas | Coef. termodinámico de temperatura | Relación de presiones | Coef. termodinámico de presión | Dosado relativo       | Velocidad de combustión laminar |
| $P$                      | $T$         | $\varphi$        | $u_L^0$                                 | $T/T^0$                  | $\alpha$                           | $P/P^0$               | $\beta$                        | $\varphi$             | $u_L$                           |
| bar                      | K           | [unidimensional] | cm/s                                    | [unidimensional]         | [unidimensional]                   | [unidimensional]      | [unidimensional]               | [unidimensional]      | cm/s                            |
| 90                       | 800         | 0,6              | 10,52                                   | 2,67                     | 2,5713                             | 90,00                 | -0,4416                        | 0,6                   | 17,95                           |
| 90                       | 800         | 0,7              | 17,19                                   | 2,67                     | 2,4620                             | 90,00                 | -0,4224                        | 0,7                   | 28,75                           |
| 90                       | 800         | 0,8              | 24,37                                   | 2,67                     | 2,3588                             | 90,00                 | -0,4028                        | 0,8                   | 40,22                           |
| 90                       | 800         | 0,9              | 30,62                                   | 2,67                     | 2,2643                             | 90,00                 | -0,3831                        | 0,9                   | 50,35                           |
| 90                       | 800         | 1                | 34,64                                   | 2,67                     | 2,1817                             | 90,00                 | -0,3635                        | 1                     | 57,36                           |
| 90                       | 800         | 1,1              | 35,64                                   | 2,67                     | 2,1144                             | 90,00                 | -0,3443                        | 1,1                   | 60,24                           |
| 90                       | 800         | 1,2              | 33,63                                   | 2,67                     | 2,0663                             | 90,00                 | -0,3258                        | 1,2                   | 58,92                           |
| 90                       | 800         | 1,3              | 29,27                                   | 2,67                     | 2,0415                             | 90,00                 | -0,3083                        | 1,3                   | 54,14                           |

## GRÁFICAS



## GRÁFICA ARTÍCULO ORIGINAL





# METANO

## DE GOEY

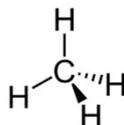
## FUENTE BIBLIOGRÁFICA

|             |   |
|-------------|---|
| PUBLICACIÓN | THE LAMINAR BURNING VELOCITY OF FLAMES PROPAGATING IN MIXTURES OF HYDROCARBONS AND AIR MEASURED WITH THE HEAT FLUX METHOD |
| AUTOR/ES    | K.J.BOSSCHAART, L.P.H.DE GOEY   |
| EDICIÓN     | ELSEVIER. REVISTA <i>COMBUSTION AND FLAME</i> VOLUMEN 136, PÁGINAS 261-269  |
| AÑO         | 2004  |
| ISSN/ISBN   | 102180  |
| ENLACE      | <a href="https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2003.10.005">https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2003.10.005</a>       |

## COMBUSTIBLE

|             |   |
|-------------|---|
| TIPO        | METANO (REPRESENTATIVO DE GAS NATURAL)  |
| NOMBRES     | IUPAC: METANO. OTROS: TETRAHIDRURO DE CARBONO, HIDRURO DE METILO, GAS DEL PANTANO   |
| FÓRMULAS    | HILL: CH <sub>4</sub>   |
| PROPIEDADES | PUNTO DE EBULLICIÓN: 111,65K (-162°C), PUNTO DE FUSIÓN: 90,7K (-182°C), MASA MOLAR: 16,04 g/mol, DENSIDAD: 0,657 g/cm <sup>3</sup> , OCTANAJE 120. HIDROCARBURO ALCANO MÁS SENCILLO. GAS DE EFECTO INVERNADERO, INCOLORO. |

### F. ESTRUCTURAL





# METANO DE GOEY

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

|               |  |
|---------------|--|
| MÉTODO        | FLUJO DE CALOR EN UN QUEMADOR DE PLACAS PERFORADAS   |
| CLASIFICACIÓN | LLAMAS ESTACIONARIAS, QUEMADOR, LLAMA PLANA, CON CONTROL DEL FLUJO DE CALOR                                      |
| INSTRUMENTAL  | PLACA DE QUEMADOR DE 30MM DE DIÁMETRO, PERFORACIONES DE 0,5MM Y PASO DE 0,7MM. LASER VELOCIMETRÍA DOPPLER (LDV). |

## EXPRESIONES DE CÁLCULO

|                |   |                 |                     |
|----------------|---|-----------------|---------------------|
| CORRELACIÓN    | INTERPOLACIÓN POLINÓMICA DE GRÁFICAS EN ARTÍCULO  | Presión en C.R. | Temperatura en C.R. |
| RANGO VALIDEZ  | DOSADO RELATIVO: 0,6 - 1,6 TEMPERATURA: 293K - 353K   | $p^0$           | $T^0$               |
| C.REFERENCIA   | PRESIÓN: 1 BAR - TEMPERATURA: 293K  | bar             | K                   |
| EXP. PRINCIPAL | <p>Para 300K:</p> $u_L [cm/s] = 816,68 \cdot \varphi^4 - 3486,9 \cdot \varphi^3 + 5270,3 \cdot \varphi^2 - 3303,9 \cdot \varphi + 739,45$ | 1               | 293                 |



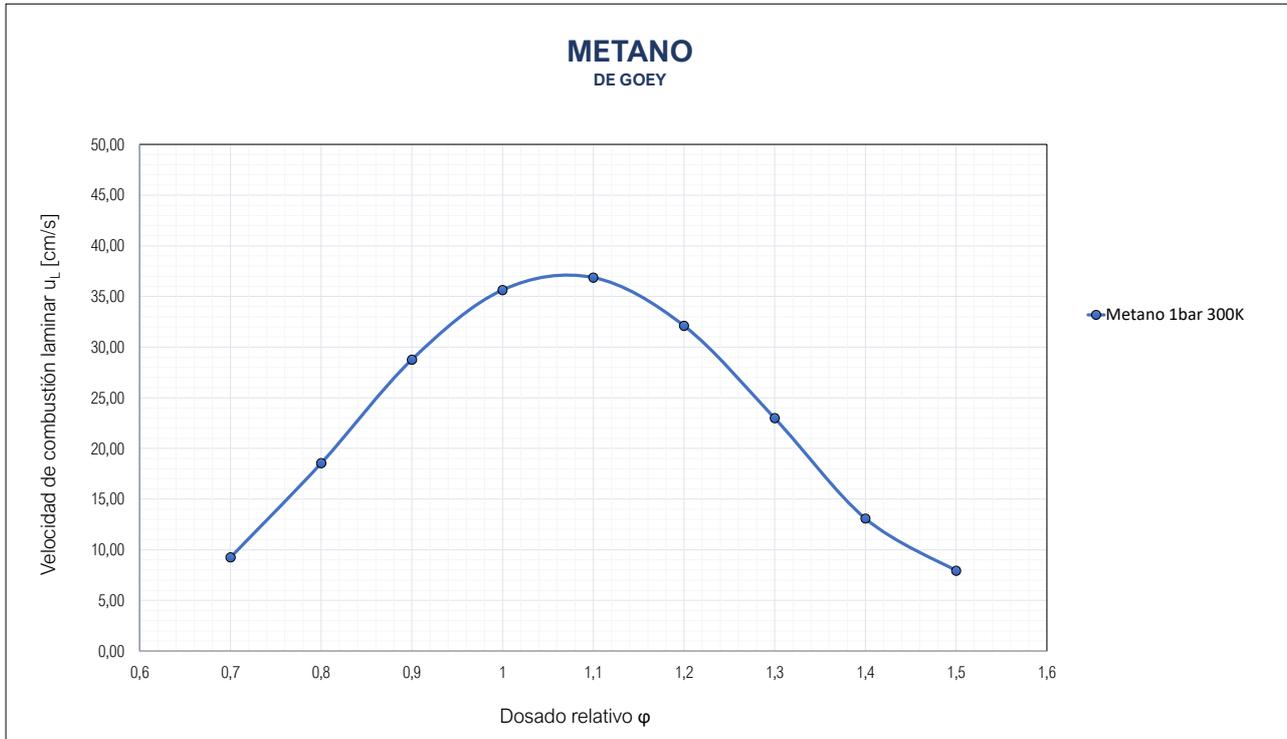
# TABLAS DE DATOS

## METANO 1 BAR 300K

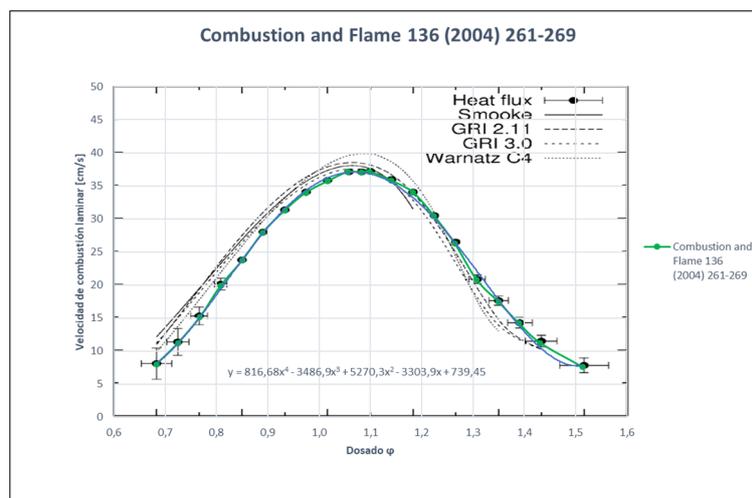
| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |             |                  |
|--------------------------|-------------|------------------|
| Presión                  | Temperatura | Dosado relativo  |
| $P$                      | $T$         | $\varphi$        |
| bar                      | K           | [unidimensional] |
| 1                        | 300         | 0,6              |
| 1                        | 300         | 0,8              |
| 1                        | 300         | 0,9              |
| 1                        | 300         | 1                |
| 1                        | 300         | 1,1              |
| 1                        | 300         | 1,2              |
| 1                        | 300         | 1,3              |
| 1                        | 300         | 1,4              |
| 1                        | 300         | 1,5              |
| 1                        | 300         | 1,6              |
| 1                        | 300         | 1,5              |

| PARÁMETROS DE GRÁFICA |                                 |
|-----------------------|---------------------------------|
| Dosado relativo       | Velocidad de combustión laminar |
| $\varphi$             | $u_L$                           |
| [unidimensional]      | cm/s                            |
| 0,6                   | 7,09                            |
| 0,7                   | 9,25                            |
| 0,8                   | 18,54                           |
| 0,9                   | 28,76                           |
| 1                     | 36,63                           |
| 1,1                   | 36,86                           |
| 1,2                   | 32,11                           |
| 1,3                   | 22,99                           |
| 1,4                   | 13,08                           |
| 1,5                   | 7,93                            |
| 1,6                   | 15,03                           |

## GRÁFICAS



## GRÁFICA ARTÍCULO ORIGINAL



# METANO

## DIRRENBARGER

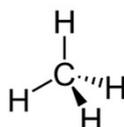
## FUENTE BIBLIOGRÁFICA

|             |  |
|-------------|--|
| PUBLICACIÓN | MEASUREMENTS OF LAMINAR FLAME VELOCITY FOR COMPONENTS OF NATURAL GAS                       |
| AUTOR/ES    | P.DIRRENBARGER, H.LE GALL, R.BOUNACEUR, O.HERBINET, P.A.GLAUDE, A.KONNOV, F.BATTIN-LECLERC |
| EDICIÓN     | AMERICAN CHEMICAL SOCIETY. REVISTA <i>ENERGY AND FUELS</i> VOLUMEN 25, PÁGINAS 3875-3884   |
| AÑO         | 2011   |
| ISSN/ISBN   | 8870624  |
| ENLACE      | <a href="https://doi.org/10.1021/ef200707h">dx.doi.org/10.1021/ef200707h</a>               |

## COMBUSTIBLE

|             |   |
|-------------|---|
| TIPO        | METANO (REPRESENTATIVO DE GAS NATURAL)  |
| NOMBRES     | IUPAC: METANO. OTROS: TETRAHIDRURO DE CARBONO, HIDRURO DE METILO, GAS DEL PANTANO   |
| FÓRMULAS    | HILL: CH <sub>4</sub>   |
| PROPIEDADES | PUNTO DE EBULLICIÓN: 111,65K (-162°C), PUNTO DE FUSIÓN: 90,7K (-182°C), MASA MOLAR: 16,04 g/mol, DENSIDAD: 0,657 g/cm <sup>3</sup> , OCTANAJE 120. HIDROCARBURO ALCANO MÁS SENCILLO. GAS DE EFECTO INVERNADERO, INCOLORO. |

### F. ESTRUCTURAL



# METANO

## DIRRENBERGER

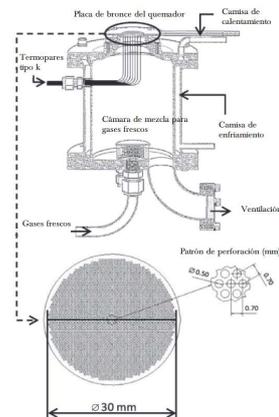
## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

**MÉTODO**  
**CLASIFICACIÓN**  
**INSTRUMENTAL**

FLUJO DE CALOR EN UN QUEMADOR DE LLAMA PLANA

LLAMAS ESTACIONARIAS, QUEMADOR, LLAMA PLANA, CON CONTROL DEL FLUJO DE CALOR

PLACA DE QUEMADOR DE 0,5MM PERFORADA CON ESPACIOS DE 0,7MM ENTRE PERFORACIONES, CONTROLADOR DE FLUJO DE MASA LÍQUIDO CORI-FLOW (MFC)



## EXPRESIONES DE CÁLCULO

**CORRELACIÓN**  
**RANGO VALIDEZ**  
**C.REFERENCIA**

ÖMER L. GÜLDER

DOSADO RELATIVO: 0,7 - 1,7, TEMPERATURA: 300 K

PRESIÓN: 1 BAR - TEMPERATURA: 298K

Presión en C.R.

Temperatura en C.R.

$p^0$

$T^0$

bar

K

1

298

**EXP. PRINCIPAL**

$$u_L [cm/s] = W\varphi^\eta e^{-\xi(\varphi-\sigma)^2}$$

|            |        |
|------------|--------|
| $W$ (cm/s) | 38,638 |
| $\eta$     | -0,15  |
| $\xi$      | 6,2706 |
| $\sigma$   | 1,1    |



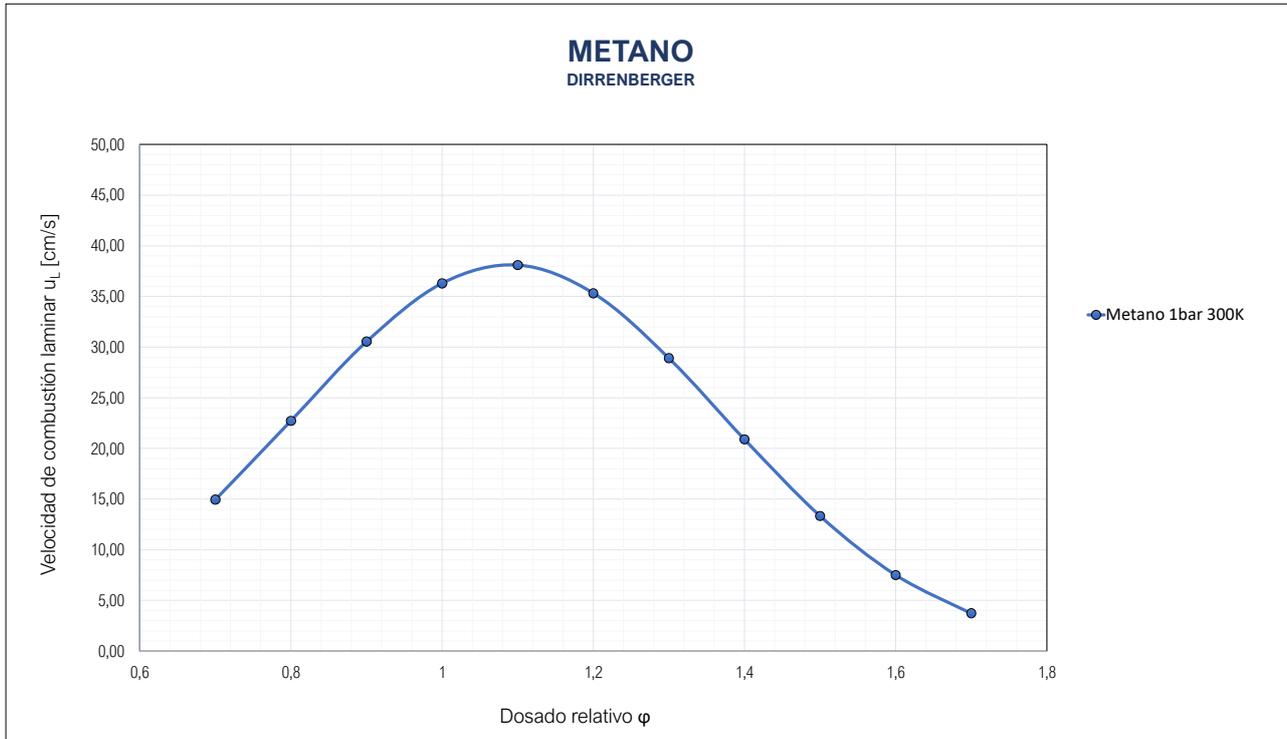
# TABLAS DE DATOS

## METANO 1 BAR 300K

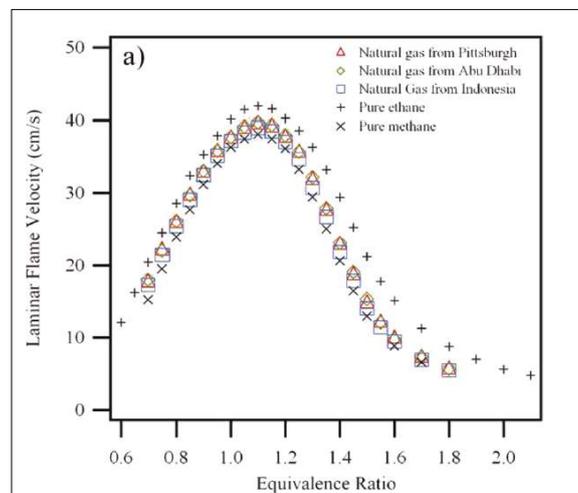
| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |             |                  |
|--------------------------|-------------|------------------|
| Presión                  | Temperatura | Dosado relativo  |
| $P$                      | $T$         | $\varphi$        |
| bar                      | K           | [unidimensional] |
| 1                        | 300         | 0,6              |
| 1                        | 300         | 0,8              |
| 1                        | 300         | 0,9              |
| 1                        | 300         | 1                |
| 1                        | 300         | 1,1              |
| 1                        | 300         | 1,2              |
| 1                        | 300         | 1,3              |
| 1                        | 300         | 1,4              |
| 1                        | 300         | 1,5              |
| 1                        | 300         | 1,6              |
| 1                        | 300         | 1,5              |

| PARÁMETROS DE GRÁFICA |                                 |
|-----------------------|---------------------------------|
| Dosado relativo       | Velocidad de combustión laminar |
| $\varphi$             | $u_L$                           |
| [unidimensional]      | cm/s                            |
| 0,7                   | 14,95                           |
| 0,8                   | 22,72                           |
| 0,9                   | 30,55                           |
| 1                     | 36,29                           |
| 1,1                   | 38,09                           |
| 1,2                   | 35,31                           |
| 1,3                   | 28,91                           |
| 1,4                   | 20,89                           |
| 1,5                   | 13,33                           |
| 1,6                   | 7,51                            |
| 1,7                   | 3,73                            |

## GRÁFICAS



## GRÁFICA ARTÍCULO ORIGINAL



# METANO

## TAHTOUH

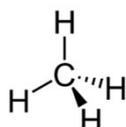
## FUENTE BIBLIOGRÁFICA

|             |   |
|-------------|---|
| PUBLICACIÓN | MEASUREMENT OF LAMINAR BURNING SPEEDS AND MARKSTEIN LENGTHS USING A NOVEL METHODOLOGY                               |
| AUTOR/ES    | T.TAHTOUH, F.HALTER, C.MOUNAÏM-ROUSSELLE  |
| EDICIÓN     | ELSEVIER. REVISTA <i>COMBUSTION AND FLAME</i> VOLUMEN 156, PÁGINAS 1735-1743  |
| AÑO         | 2009  |
| ISSN/ISBN   | 0010-2180   |
| ENLACE      | <a href="https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2009.03.013">https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2009.03.013</a> |

## COMBUSTIBLE

|             |   |
|-------------|---|
| TIPO        | METANO (REPRESENTATIVO DE GAS NATURAL)  |
| NOMBRES     | IUPAC: METANO. OTROS: TETRAHIDRURO DE CARBONO, HIDRURO DE METILO, GAS DEL PANTANO   |
| FÓRMULAS    | HILL: CH <sub>4</sub>   |
| PROPIEDADES | PUNTO DE EBULLICIÓN: 111,65K (-162°C), PUNTO DE FUSIÓN: 90,7K (-182°C), MASA MOLAR: 16,04 g/mol, DENSIDAD: 0,657 g/cm <sup>3</sup> , OCTANAJE 120. HIDROCARBURO ALCANO MÁS SENCILLO. GAS DE EFECTO INVERNADERO, INCOLORO. |

### F. ESTRUCTURAL



# METANO

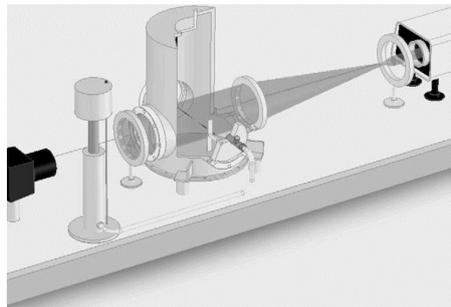
## TAHTOUH

### METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

**MÉTODO**  
**CLASIFICACIÓN**  
**INSTRUMENTAL**

BOMBA DE COMBUSTIÓN CILÍNDRICA A VOLUMEN CONSTANTE  
 LLAMAS QUE SE PROPAGAN LIBREMENTE, BOMBA, MEDIDA DE LA PRESIÓN

BOMBA DE COMBUSTIÓN CILÍNDRICA DE ACERO INOXIDABLE CON VOLUMEN INTERIOR DE 24,32 L. ELECTROCODOS DE TUNGSTENO DE 0,8MM DE DIÁMETRO. SISTEMA DE ACCESO ÓPTICO POR DOS VENTANAS DE 10,5 CM. ILUMINACIÓN CON LÁSER STABILITE 2019 CONTINUO, LONGITUDES DE ONDA 457,9-514,5 NM. CÁMARA CMOS APX ALTA VELOCIDAD 8000 FPS.



### EXPRESIONES DE CÁLCULO

**CORRELACIÓN**  
**RANGO VALIDEZ**  
**C.REFERENCIA**  
**EXP. POLINOM.**  
**EXP. ARTÍCULO**  
**TABLA DATOS**

MARKSTEIN LENGTH, INTERPOLACIÓN POLINÓMICA DE GRÁFICAS EN ARTÍCULO

DOSADO RELATIVO: 0,55 - 1,3, TEMPERATURA: 300 K  
 PRESIÓN: 1 BAR - TEMPERATURA: 300K

$$u_L [cm/s] = -142,2 \cdot \varphi^3 + 268,31 \cdot \varphi^2 - 84,815 \cdot \varphi - 6,0574$$

$$u_L [cm/s] = W\varphi^{\eta} e^{-\xi(\varphi-\sigma)^2}$$

Presión en C.R.

Temperatura en C.R.

$$p^0$$

$$T^0$$

bar

K

1

300

Table 3  
 Laminar burning speed and Markstein length values obtained with the three different methodologies: CH<sub>4</sub>/air mixtures, P=0.1 MPa, T=300 K.

| ER   | Polynomial methodology |                     | Analytical methodology |                     | New methodology       |                     |
|------|------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|
|      | u <sub>L</sub> (cm/s)  | L <sub>s</sub> (mm) | u <sub>L</sub> (cm/s)  | L <sub>s</sub> (mm) | u <sub>L</sub> (cm/s) | L <sub>s</sub> (mm) |
| 0.55 | 4.91                   | -0.12               | 5.11                   | -0.12               | 5.24                  | 0.01                |
| 0.6  | 8.84                   | 0.08                | 8.94                   | 0.17                | 8.84                  | 0.08                |
| 0.7  | 17.24                  | 0.38                | 17.10                  | 0.31                | 17.25                 | 0.38                |
| 0.8  | 24.94                  | 0.54                | 25.22                  | 0.63                | 25.00                 | 0.56                |
| 0.9  | 31.05                  | 0.68                | 31.42                  | 0.78                | 31.00                 | 0.66                |
| 1.0  | 35.16                  | 0.84                | 35.58                  | 0.95                | 35.15                 | 0.84                |
| 1.1  | 36.11                  | 1.02                | 36.12                  | 1.03                | 35.96                 | 0.98                |
| 1.2  | 32.74                  | 1.45                | 32.87                  | 1.52                | 32.48                 | 1.40                |
| 1.3  | 26.83                  | 4.55                | 26.98                  | 3.19                | 24.84                 | 3.69                |



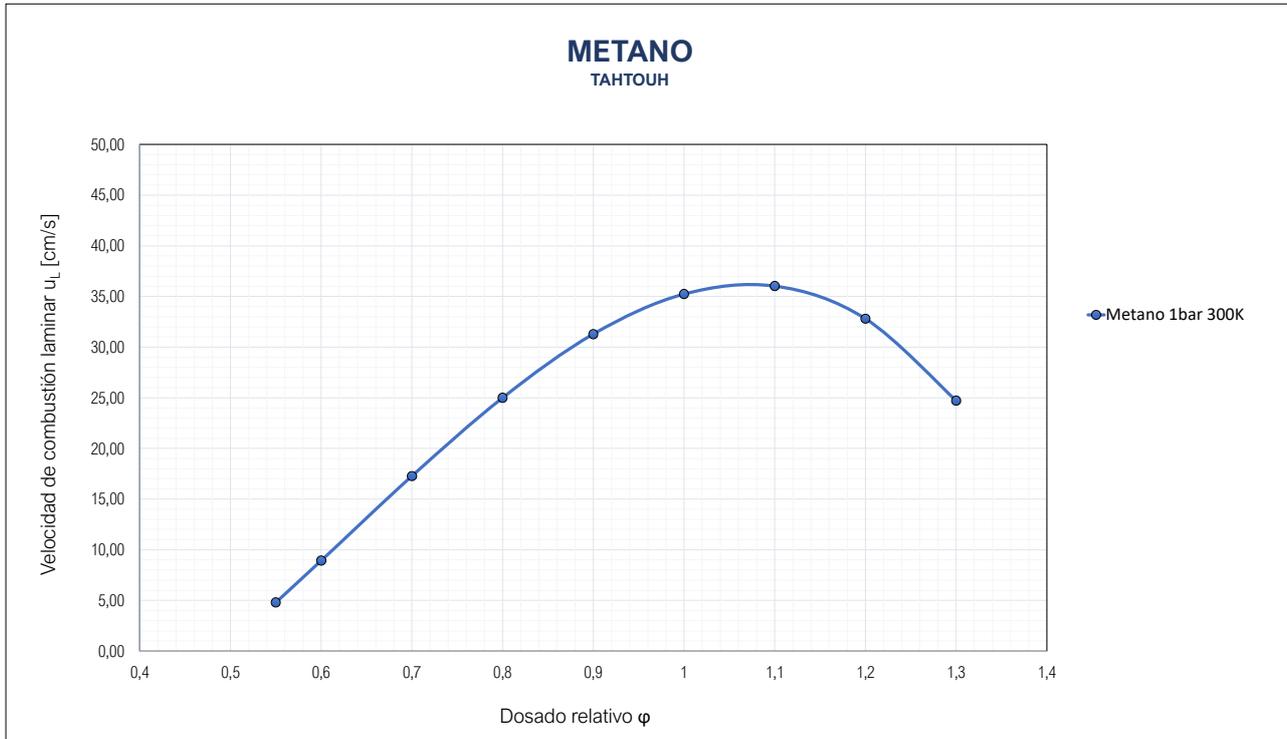
## TABLAS DE DATOS

### METANO 1 BAR 300K

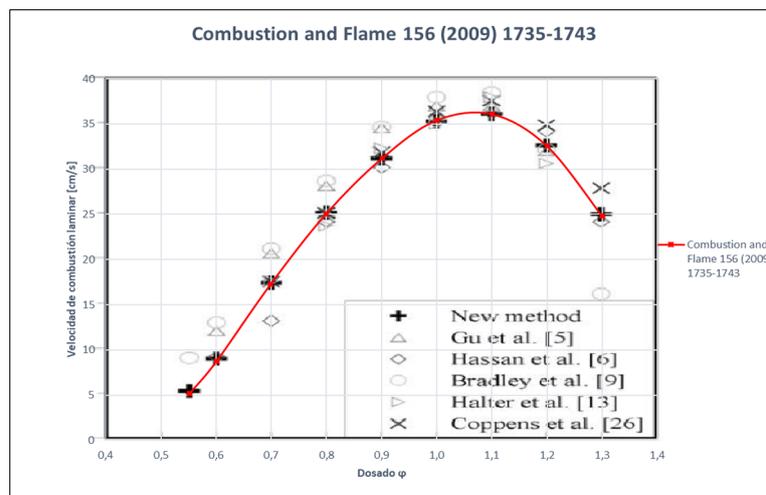
| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |             |                  |
|--------------------------|-------------|------------------|
| Presión                  | Temperatura | Dosado relativo  |
| $P$                      | $T$         | $\varphi$        |
| bar                      | K           | [unidimensional] |
| 1                        | 300         | 0,6              |
| 1                        | 300         | 0,8              |
| 1                        | 300         | 0,9              |
| 1                        | 300         | 1                |
| 1                        | 300         | 1,1              |
| 1                        | 300         | 1,2              |
| 1                        | 300         | 1,3              |
| 1                        | 300         | 1,4              |
| 1                        | 300         | 1,5              |

| PARÁMETROS DE GRÁFICA |                                 |
|-----------------------|---------------------------------|
| Dosado relativo       | Velocidad de combustión laminar |
| $\varphi$             | $u_L$                           |
| [unidimensional]      | cm/s                            |
| 0,55                  | 4,80                            |
| 0,6                   | 8,93                            |
| 0,7                   | 17,27                           |
| 0,8                   | 25,00                           |
| 0,9                   | 31,28                           |
| 1                     | 35,24                           |
| 1,1                   | 36,03                           |
| 1,2                   | 32,81                           |
| 1,3                   | 24,71                           |

## GRÁFICAS



## GRÁFICA ARTÍCULO ORIGINAL





# HIDRÓGENO

## VERHELST

### FUENTE BIBLIOGRÁFICA

|             |   |
|-------------|---|
| PUBLICACIÓN | A CORRELATION FOR THE LAMINAR BURNING VELOCITY FOR USE IN HYDROGEN SPARK IGNITION ENGINE SIMULATION         |
| AUTOR/ES    | S.VERHELST, C.T'JOEN, J.VANCOILLIE, J.DEMUYNCK  |
| EDICIÓN     | ELSEVIER. REVISTA <i>INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY</i> VOLUMEN 36, PÁGINAS 957-974               |
| AÑO         | 2011  |
| ISSN/ISBN   | 0360-3199   |
| ENLACE      | <a href="https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.10.020">https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.10.020</a> |

### COMBUSTIBLE

|                |  |
|----------------|--|
| TIPO           | HIDRÓGENO  |
| NOMBRES        | IUPAC: DIHIDRÓGENO. OTROS: HIDRÓGENO MOLECULAR, GAS HIDRÓGENO  |
| FÓRMULA        | H <sub>2</sub>   |
| PROPIEDADES    | PUNTO DE EBULLICIÓN: 20,268K (-253°C), PUNTO DE FUSIÓN: 14,025K (-259°C), MASA MOLAR: 2,01589 g/mol, DENSIDAD: 0,0838 kg/cm <sup>3</sup> , OCTANAJE 140. GAS INFLAMABLE, INCOLORO E INODORO. NO ES FUENTE DE ENERGÍA PRIMARIA. |
| F. ESTRUCTURAL | H<br> <br>H  |



# HIDRÓGENO

## VERHELST

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### MÉTODO FUNDAMENTO HIPÓTESIS

ESQUEMA DE REACCIÓN DE KONNOV

EVALUACIÓN DE LAS REACCIONES QUÍMICAS DE OXIDACIÓN QUE SE PRODUCEN EN EL FRENTE DE LLAMA

- MEZCLA DE 12 ESPECIES: COMBUSTIBLE, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub>, NO, HIDROCARBUROS SIN QUEMAR (UHC, O, H, OH), CONSIDERADO COMO UN GAS IDEAL
- LA COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA SE CONSIDERA HOMOGÉNEA EN CADA ZONA (GASES FRESCOS Y QUEMADOS)
- SE SUPONE PRESIÓN IDÉNTICA EN AMBAS ZONAS
- CADA ZONA SE DESCRIBE POR SU MASA, VOLUMEN, COMPOSICIÓN Y TEMPERATURA
- SE SUPONE QUE EL CAMPO DE ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTO ES UNIFORME EN EL CILINDRO

## EXPRESIONES DE CÁLCULO

### CORRELACIÓN RANGO VALIDEZ

METGHALCHI Y KECK

 DOSADO: 0,33 - 5, PRESIÓN: 5 BAR - 45 BAR, TEMPERATURA:  
 500K - 900K

### C.REFERENCIA

PRESIÓN: 1 BAR - TEMPERATURA: 300K

### EXP. PRINCIPAL EXP. AUXILIARES

$$u_L [cm/s] = u_L^0 \cdot \left(\frac{T}{T^0}\right)^\alpha$$

$$\ln u_L^0 [cm/s] = b_1 + b_2 \cdot \lambda + b_3 \cdot \frac{P}{P_0} + b_4 \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \lambda + b_5 \cdot \lambda^2 + b_6 \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^2 + b_7 \cdot \lambda^2 \cdot \frac{P}{P_0} + b_8 \cdot \lambda \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^2 + b_9 \cdot \lambda^3 \cdot \frac{P}{P_0} + b_{10} \cdot \lambda \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^3 + b_{11} \cdot \lambda^2 \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^2 + \frac{b_{12}}{\lambda} + b_{13} \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{1}{\lambda}$$

$$\alpha = a_1 + a_2 \cdot \lambda + a_3 \cdot \frac{P}{P_0} + a_4 \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \lambda + a_5 \cdot \lambda^2 + a_6 \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^2 + a_7 \cdot \lambda^2 \cdot \frac{P}{P_0} + a_8 \cdot \lambda \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^2 + a_9 \cdot \lambda^2 \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^2 + \frac{a_{10}}{\lambda} + a_{11} \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{1}{\lambda}$$

Presión en C.R.

Temperatura en C.R.

 $P^0$ 
 $T^0$ 

bar

K

1

300

|                 |               |                 |               |
|-----------------|---------------|-----------------|---------------|
| a <sub>1</sub>  | 0.584069      | b <sub>1</sub>  | 7.505661      |
| a <sub>2</sub>  | 1.097884      | b <sub>2</sub>  | -1.903711     |
| a <sub>3</sub>  | -3.683272 e-2 | b <sub>3</sub>  | 5.380840 e-2  |
| a <sub>4</sub>  | 2.454259 e-2  | b <sub>4</sub>  | -3.936929 e-2 |
| a <sub>5</sub>  | 0.104381      | b <sub>5</sub>  | 1.896873 e-2  |
| a <sub>6</sub>  | -4.119350 e-4 | b <sub>6</sub>  | 5.964680 e-4  |
| a <sub>7</sub>  | 7.621143 e-3  | b <sub>7</sub>  | -3.010525 e-2 |
| a <sub>8</sub>  | 7.62759 e-4   | b <sub>8</sub>  | -3.431092 e-4 |
| a <sub>9</sub>  | -4.498380 e-4 | b <sub>9</sub>  | 9.023031 e-4  |
| a <sub>10</sub> | 0.331465      | b <sub>10</sub> | -1.556492 e-5 |
| a <sub>11</sub> | 2.165434 e-2  | b <sub>11</sub> | 8.452404 e-4  |
|                 |               | b <sub>12</sub> | -0.478534     |
|                 |               | b <sub>13</sub> | -3.105883 e-2 |

## TABLAS DE DATOS

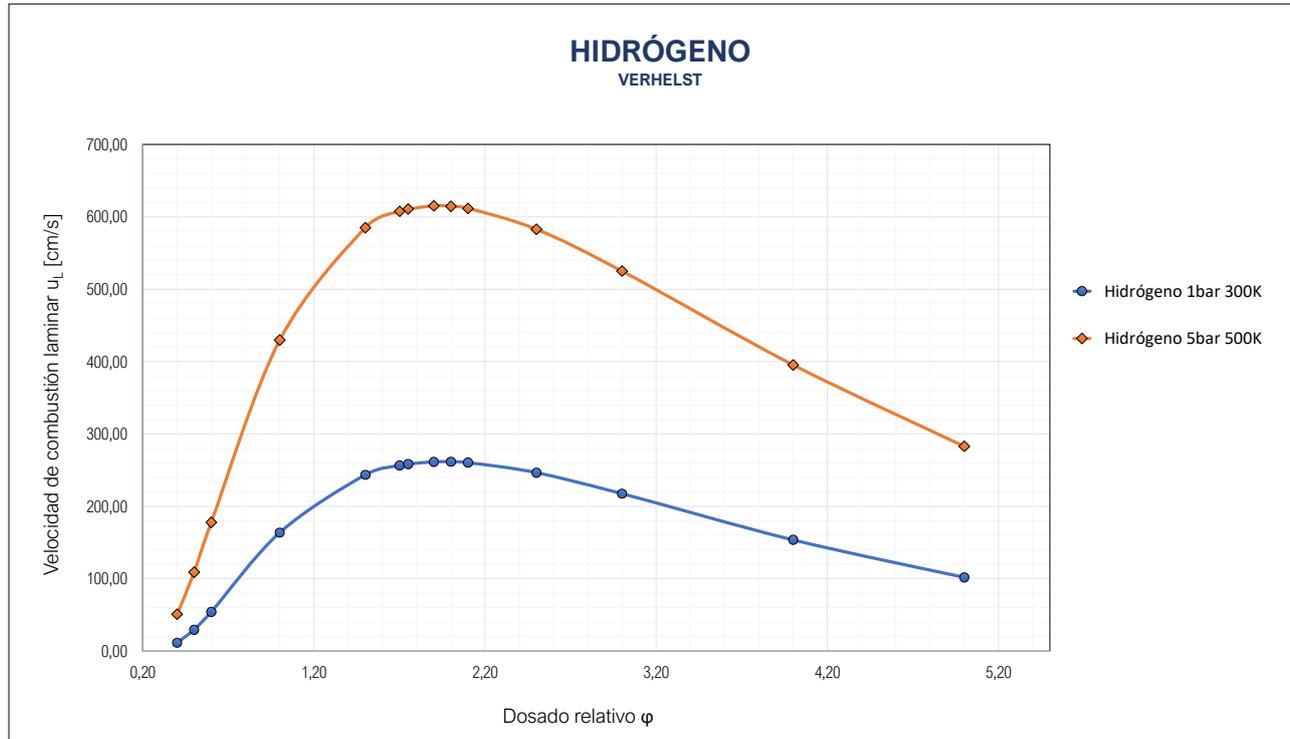
### HIDRÓGENO 1 BAR 300 K

| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |             |                  | PARÁMETROS DE CÁLCULO                   |                          |                                    |                       |                                | PARÁMETROS DE GRÁFICA |                                 |
|--------------------------|-------------|------------------|---|--------------------------|------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Presión                  | Temperatura | Dosado relativo  | Velocidad de combustión laminar en C.R. | Relación de temperaturas | Coef. termodinámico de temperatura | Relación de presiones | Coef. termodinámico de presión | Dosado relativo       | Velocidad de combustión laminar |
| $P$                      | $T$         | $\varphi$        | $u_L^0$                                 | $T/T^0$                  | $\alpha$                           | $P/P^0$               | $\beta$                        | $\varphi$             | $u_L$                           |
| bar                      | K           | [unidimensional] | cm/s                                    | [unidimensional]         | [unidimensional]                   | [unidimensional]      | [unidimensional]               | [unidimensional]      | cm/s                            |
| 1                        | 300         | 0,4              | 11,56                                   | 1,00                     | 4,19                               | 1,00                  | -                              | 0,40                  | 11,56                           |
| 1                        | 300         | 0,5              | 29,50                                   | 1,00                     | 3,42                               | 1,00                  | -                              | 0,50                  | 29,50                           |
| 1                        | 300         | 0,6              | 54,10                                   | 1,00                     | 2,94                               | 1,00                  | -                              | 0,60                  | 54,10                           |
| 1                        | 300         | 1                | 163,64                                  | 1,00                     | 2,13                               | 1,00                  | -                              | 1,00                  | 163,64                          |
| 1                        | 300         | 1,5              | 243,65                                  | 1,00                     | 1,87                               | 1,00                  | -                              | 1,50                  | 243,65                          |
| 1                        | 300         | 1,7              | 256,51                                  | 1,00                     | 1,85                               | 1,00                  | -                              | 1,70                  | 256,51                          |
| 1                        | 300         | 1,75             | 258,41                                  | 1,00                     | 1,84                               | 1,00                  | -                              | 1,75                  | 258,41                          |
| 1                        | 300         | 1,9              | 261,45                                  | 1,00                     | 1,84                               | 1,00                  | -                              | 1,90                  | 261,45                          |
| 1                        | 300         | 2                | 261,57                                  | 1,00                     | 1,84                               | 1,00                  | -                              | 2,00                  | 261,57                          |
| 1                        | 300         | 2,1              | 260,40                                  | 1,00                     | 1,85                               | 1,00                  | -                              | 2,10                  | 260,40                          |
| 1                        | 300         | 2,5              | 246,44                                  | 1,00                     | 1,90                               | 1,00                  | -                              | 2,50                  | 246,44                          |
| 1                        | 300         | 3                | 217,54                                  | 1,00                     | 1,99                               | 1,00                  | -                              | 3,00                  | 217,54                          |
| 1                        | 300         | 4                | 153,73                                  | 1,00                     | 2,25                               | 1,00                  | -                              | 4,00                  | 153,73                          |
| 1                        | 300         | 5                | 101,80                                  | 1,00                     | 2,54                               | 1,00                  | -                              | 5,00                  | 101,80                          |

### HIDRÓGENO 5 BAR 500 K

| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |             |                  | PARÁMETROS DE CÁLCULO                   |                          |                                    |                       |                                | PARÁMETROS DE GRÁFICA |                                 |
|--------------------------|-------------|------------------|---|--------------------------|------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Presión                  | Temperatura | Dosado relativo  | Velocidad de combustión laminar en C.R. | Relación de temperaturas | Coef. termodinámico de temperatura | Relación de presiones | Coef. termodinámico de presión | Dosado relativo       | Velocidad de combustión laminar |
| $P$                      | $T$         | $\varphi$        | $u_L^0$                                 | $T/T^0$                  | $\alpha$                           | $P/P^0$               | $\beta$                        | $\varphi$             | $u_L$                           |
| bar                      | K           | [unidimensional] | cm/s                                    | [unidimensional]         | [unidimensional]                   | [unidimensional]      | [unidimensional]               | [unidimensional]      | cm/s                            |
| 5                        | 500         | 0,4              | 5,15                                    | 1,67                     | 4,48                               | 5,00                  | -                              | 0,40                  | 50,89                           |
| 5                        | 500         | 0,5              | 17,20                                   | 1,67                     | 3,61                               | 5,00                  | -                              | 0,50                  | 108,95                          |
| 5                        | 500         | 0,6              | 36,78                                   | 1,67                     | 3,08                               | 5,00                  | -                              | 0,60                  | 177,76                          |
| 5                        | 500         | 1                | 139,60                                  | 1,67                     | 2,20                               | 5,00                  | -                              | 1,00                  | 429,55                          |
| 5                        | 500         | 1,5              | 217,84                                  | 1,67                     | 1,93                               | 5,00                  | -                              | 1,50                  | 585,04                          |
| 5                        | 500         | 1,7              | 228,84                                  | 1,67                     | 1,91                               | 5,00                  | -                              | 1,70                  | 607,65                          |
| 5                        | 500         | 1,75             | 230,18                                  | 1,67                     | 1,91                               | 5,00                  | -                              | 1,75                  | 610,78                          |
| 5                        | 500         | 1,9              | 231,44                                  | 1,67                     | 1,91                               | 5,00                  | -                              | 1,90                  | 615,23                          |
| 5                        | 500         | 2                | 230,30                                  | 1,67                     | 1,92                               | 5,00                  | -                              | 2,00                  | 614,64                          |
| 5                        | 500         | 2,1              | 227,86                                  | 1,67                     | 1,93                               | 5,00                  | -                              | 2,10                  | 611,70                          |
| 5                        | 500         | 2,5              | 209,19                                  | 1,67                     | 2,01                               | 5,00                  | -                              | 2,50                  | 582,81                          |
| 5                        | 500         | 3                | 176,33                                  | 1,67                     | 2,14                               | 5,00                  | -                              | 3,00                  | 525,20                          |
| 5                        | 500         | 4                | 112,13                                  | 1,67                     | 2,47                               | 5,00                  | -                              | 4,00                  | 395,34                          |
| 5                        | 500         | 5                | 66,28                                   | 1,67                     | 2,84                               | 5,00                  | -                              | 5,00                  | 282,98                          |

## GRÁFICAS





# HIDRÓGENO

## IJIMA

## FUENTE BIBLIOGRÁFICA

|             |   |
|-------------|---|
| PUBLICACIÓN | EFFECTS OF TEMPERATURA AND PRESSURE ON BURNING VELOCITY   |
| AUTOR/ES    | TOSHIO IJIMA, TADAO TAKENO  |
| EDICIÓN     | ELSEVIER. REVISTA <i>COMBUSTION AND FLAME</i> VOLUMEN 65, PÁGINAS 35-43                                 |
| AÑO         | 1986  |
| ISSN/ISBN   | 102180  |
| ENLACE      | <a href="https://doi.org/10.1016/0010-2180(86)90070-2">https://doi.org/10.1016/0010-2180(86)90070-2</a> |

## COMBUSTIBLE

|                |  |
|----------------|--|
| TIPO           | HIDRÓGENO  |
| NOMBRES        | IUPAC: DIHIDRÓGENO. OTROS: HIDRÓGENO MOLECULAR, GAS HIDRÓGENO  |
| FÓRMULA        | H <sub>2</sub>   |
| PROPIEDADES    | PUNTO DE EBULLICIÓN: 20,268K (-253°C), PUNTO DE FUSIÓN: 14,025K (-259°C), MASA MOLAR: 2,01589 g/mol, DENSIDAD: 0,0838 kg/cm <sup>3</sup> , OCTANAJE 140. GAS INFLAMABLE, INCOLORO E INODORO. NO ES FUENTE DE ENERGÍA PRIMARIA. |
| F. ESTRUCTURAL | H<br> <br>H  |

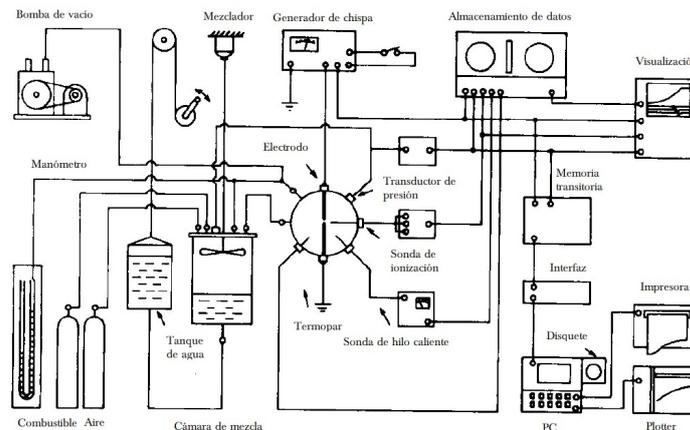
# HIDRÓGENO

## IIJIMA

### METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

**MÉTODO**  
**CLASIFICACIÓN**  
**INSTRUMENTAL**

BOMBA DE COMBUSTIÓN ESFÉRICA A VOLUMEN CONSTANTE  
 LLAMAS QUE SE PROPAGAN LIBREMENTE, BOMBA, MEDIDA DE LA PRESIÓN  
 TRANSDUCTOR PIEZOELÉCTRICO KISTLER 6421A20, TERMOPAR CHROMEL-CONSTANT 50 ~zm



### EXPRESIONES DE CÁLCULO

**CORRELACIÓN**  
**RANGO VALIDEZ**

IIJIMA Y TAKENO  
 DOSADO: 0,5 - 4, PRESIÓN: 0,5 BAR - 25 BAR, TEMPERATURA:  
 291K - 500K

Presión en C.R.

Temperatura en C.R.

$p^0$

$T^0$

bar

K

**C.REFERENCIA**

PRESIÓN: 1 BAR - TEMPERATURA: 291K

1

291

**EXP. PRINCIPAL**  
**EXP. AUXILIARES**

$$u_L [cm/s] = u_L^0 \cdot \left(1 + \beta \cdot \log\left(\frac{P}{P^0}\right)\right) \cdot \left(\frac{T}{T^0}\right)^\alpha$$

$$u_L^0 [cm/s] = 2,98 - 1,00 \cdot (\varphi - 1,70)^2 - 0,32 \cdot (\varphi - 1,70)^3$$

$$\alpha = 1,54 + 0,026 \cdot (\varphi - 1)$$

$$\beta = 0,43 + 0,003 \cdot (\varphi - 1)$$



## TABLAS DE DATOS

## HIDRÓGENO 1 BAR 300 K

| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |             |                  | PARÁMETROS DE CÁLCULO                   |                          |                                    |                       |                                | PARÁMETROS DE GRÁFICA |                                 |
|--------------------------|-------------|------------------|---|--------------------------|------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Presión                  | Temperatura | Dosado relativo  | Velocidad de combustión laminar en C.R. | Relación de temperaturas | Coef. termodinámico de temperatura | Relación de presiones | Coef. termodinámico de presión | Dosado relativo       | Velocidad de combustión laminar |
| $P$                      | $T$         | $\varphi$        | $u_L^0$                                 | $T/T^0$                  | $\alpha$                           | $P/P^0$               | $\beta$                        | $\varphi$             | $u_L$                           |
| bar                      | K           | [unidimensional] | cm/s                                    | [unidimensional]         | [unidimensional]                   | [unidimensional]      | [unidimensional]               | [unidimensional]      | cm/s                            |
| 1                        | 300         | 0,5              | 98,7                                    | 1,03                     | 1,53                               | 1,00                  | 0,43                           | 0,5                   | 103,4                           |
| 1                        | 300         | 0,6              | 134,4                                   | 1,03                     | 1,53                               | 1,00                  | 0,43                           | 0,6                   | 140,8                           |
| 1                        | 300         | 0,8              | 193,7                                   | 1,03                     | 1,53                               | 1,00                  | 0,43                           | 0,8                   | 202,9                           |
| 1                        | 300         | 1,0              | 238,0                                   | 1,03                     | 1,54                               | 1,00                  | 0,43                           | 1,0                   | 249,5                           |
| 1                        | 300         | 1,5              | 293,7                                   | 1,03                     | 1,55                               | 1,00                  | 0,43                           | 1,5                   | 308,0                           |
| 1                        | 300         | 1,7              | 298,0                                   | 1,03                     | 1,56                               | 1,00                  | 0,43                           | 1,7                   | 312,5                           |
| 1                        | 300         | 1,8              | 297,8                                   | 1,03                     | 1,56                               | 1,00                  | 0,43                           | 1,8                   | 312,2                           |
| 1                        | 300         | 1,9              | 294,3                                   | 1,03                     | 1,56                               | 1,00                  | 0,43                           | 1,9                   | 308,6                           |
| 1                        | 300         | 2,0              | 289,9                                   | 1,03                     | 1,57                               | 1,00                  | 0,43                           | 2,0                   | 304,0                           |
| 1                        | 300         | 2,1              | 284,0                                   | 1,03                     | 1,57                               | 1,00                  | 0,43                           | 2,1                   | 297,9                           |
| 1                        | 300         | 2,5              | 250,4                                   | 1,03                     | 1,58                               | 1,00                  | 0,43                           | 2,5                   | 262,7                           |
| 1                        | 300         | 3,0              | 199,3                                   | 1,03                     | 1,59                               | 1,00                  | 0,44                           | 3,0                   | 209,2                           |
| 1                        | 300         | 4,0              | 158,3                                   | 1,03                     | 1,62                               | 1,00                  | 0,44                           | 4,0                   | 166,3                           |

## HIDRÓGENO 5 BAR 500 K

| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |             |                  | PARÁMETROS DE CÁLCULO                   |                          |                                    |                       |                                | PARÁMETROS DE GRÁFICA |                                 |
|--------------------------|-------------|------------------|---|--------------------------|------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Presión                  | Temperatura | Dosado relativo  | Velocidad de combustión laminar en C.R. | Relación de temperaturas | Coef. termodinámico de temperatura | Relación de presiones | Coef. termodinámico de presión | Dosado relativo       | Velocidad de combustión laminar |
| $P$                      | $T$         | $\varphi$        | $u_L^0$                                 | $T/T^0$                  | $\alpha$                           | $P/P^0$               | $\beta$                        | $\varphi$             | $u_L$                           |
| bar                      | K           | [unidimensional] | cm/s                                    | [unidimensional]         | [unidimensional]                   | [unidimensional]      | [unidimensional]               | [unidimensional]      | cm/s                            |
| 5                        | 500         | 0,5              | 98,7                                    | 1,72                     | 1,53                               | 5,00                  | 0,43                           | 0,5                   | 293,1                           |
| 5                        | 500         | 0,6              | 134,4                                   | 1,72                     | 1,53                               | 5,00                  | 0,43                           | 0,6                   | 399,8                           |
| 5                        | 500         | 0,8              | 193,7                                   | 1,72                     | 1,53                               | 5,00                  | 0,43                           | 0,8                   | 577,9                           |
| 5                        | 500         | 1,0              | 238,0                                   | 1,72                     | 1,54                               | 5,00                  | 0,43                           | 1,0                   | 712,5                           |
| 5                        | 500         | 1,5              | 293,7                                   | 1,72                     | 1,55                               | 5,00                  | 0,43                           | 1,5                   | 886,2                           |
| 5                        | 500         | 1,7              | 298,0                                   | 1,72                     | 1,56                               | 5,00                  | 0,43                           | 1,7                   | 901,8                           |
| 5                        | 500         | 1,8              | 297,8                                   | 1,72                     | 1,56                               | 5,00                  | 0,43                           | 1,8                   | 901,8                           |
| 5                        | 500         | 1,9              | 294,3                                   | 1,72                     | 1,56                               | 5,00                  | 0,43                           | 1,9                   | 893,3                           |
| 5                        | 500         | 2,0              | 289,9                                   | 1,72                     | 1,57                               | 5,00                  | 0,43                           | 2,0                   | 881,4                           |
| 5                        | 500         | 2,1              | 284,0                                   | 1,72                     | 1,57                               | 5,00                  | 0,43                           | 2,1                   | 865,0                           |
| 5                        | 500         | 2,5              | 250,4                                   | 1,72                     | 1,58                               | 5,00                  | 0,43                           | 2,5                   | 767,3                           |
| 5                        | 500         | 3,0              | 199,3                                   | 1,72                     | 1,59                               | 5,00                  | 0,44                           | 3,0                   | 615,6                           |
| 5                        | 500         | 4,0              | 158,3                                   | 1,72                     | 1,62                               | 5,00                  | 0,44                           | 4,0                   | 496,8                           |

## GRÁFICAS





# HIDRÓGENO

## GERKE

## FUENTE BIBLIOGRÁFICA

|             |   |
|-------------|---|
| PUBLICACIÓN | DERIVATION OF BURNING VELOCITIES OF PREMIXED HYDROGEN/AIR FLAMES AT ENGINE -RELEVANT CONDITIONS USING A SINGLE-CYLINDER COMPRESSION MACHINE WITH OPTICAL ACCESS |
| AUTOR/ES    | U. GERKE, K. STEURS, P. REBECCHI, K. BOULOUCHOS   |
| EDICIÓN     | ELSEVIER. REVISTA <i>INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY</i> VOLUMEN 35, PÁGINAS 2566-2577   |
| AÑO         | 2010  |
| ISSN/ISBN   | 3603199   |
| ENLACE      | <a href="https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.12.064">https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.12.064</a>   |

## COMBUSTIBLE

|                |  |
|----------------|--|
| TIPO           | HIDRÓGENO  |
| NOMBRES        | IUPAC: DIHIDRÓGENO. OTROS: HIDRÓGENO MOLECULAR, GAS HIDRÓGENO  |
| FÓRMULA        | H <sub>2</sub>   |
| PROPIEDADES    | PUNTO DE EBULLICIÓN: 20,268K (-253°C), PUNTO DE FUSIÓN: 14,025K (-259°C), MASA MOLAR: 2,01589 g/mol, DENSIDAD: 0,0838 kg/cm <sup>3</sup> , OCTANAJE 140. GAS INFLAMABLE, INCOLORO E INODORO. NO ES FUENTE DE ENERGÍA PRIMARIA. |
| F. ESTRUCTURAL | H<br> <br>H  |



# HIDRÓGENO

## GERKE

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### MÉTODO CLASIFICACIÓN INSTRUMENTAL

MÁQUINA DE COMPRESIÓN DE UN SOLO CILINDRO, AUTO-IGNICIÓN

LLAMAS QUE SE PROPAGAN LIBREMENTE, BOMBA, MEDIDA DE LA PRESIÓN

CÁMARA DE COMBUSTIÓN AXIALMENTE SIMÉTRICA, CON LLANURA EN LA CABEZA DE CILINDRO Y DIÁMETRO DE 84 MM. PISTÓN EQUIPADO CON VENTANA DE CUARZO DE 45 MM QUE PERMITE ACCESO ÓPTICO. BUJÍA POSICIONADA CON UN EMPLAZAMIENTO DE 17 MM AL EJE VERTICAL CENTRAL.

## EXPRESIONES DE CÁLCULO

### CORRELACIÓN RANGO VALIDEZ

METGHALCHI Y KECK

DOSADO: 0,4 - 2,5, PRESIÓN: 10 BAR - 45 BAR, TEMPERATURA:  
350K - 700K

### C.REFERENCIA

PRESIÓN: 10 BAR - TEMPERATURA: 600K

### EXP. PRINCIPAL EXP. AUXILIARES

$$u_L [cm/s] = u_L^0 \cdot \left(\frac{T}{T^0}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{P}{P^0}\right)^\beta$$

$$u_L^0 [cm/s] = a_6 \varphi^6 + a_5 \varphi^5 + a_4 \varphi^4 + a_3 \varphi^3 + a_2 \varphi^2 + a_1 \varphi + a_0$$

$$\alpha = 0,0163 \cdot \left(\frac{1}{\varphi}\right) + 2,2937$$

$$\beta = 0,2037 \cdot \left(\frac{1}{\varphi}\right) - 0,575$$

Presión en C.R.

Temperatura en C.R.

 $P^0$  $T^0$ 

bar

K

10

600

|       |         |
|-------|---------|
| $a_0$ | 1,2994  |
| $a_1$ | -13,976 |
| $a_2$ | 52,317  |
| $a_3$ | -46,525 |
| $a_4$ | 18,498  |
| $a_5$ | -3,4774 |
| $a_6$ | 0,25    |

# TABLAS DE DATOS

## HIDRÓGENO 10 BAR 600 K

| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |             |                  | PARÁMETROS DE CÁLCULO                   |                          |                                    |                       |                                | PARÁMETROS DE GRÁFICA |                                 |
|--------------------------|-------------|------------------|---|--------------------------|------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Presión                  | Temperatura | Dosado relativo  | Velocidad de combustión laminar en C.R. | Relación de temperaturas | Coef. termodinámico de temperatura | Relación de presiones | Coef. termodinámico de presión | Dosado relativo       | Velocidad de combustión laminar |
| $P$                      | $T$         | $\phi$           | $u_L^0$                                 | $T/T^0$                  | $\alpha$                           | $P/P^0$               | $\beta$                        | $\phi$                | $u_L$                           |
| bar                      | K           | [unidimensional] | cm/s                                    | [unidimensional]         | [unidimensional]                   | [unidimensional]      | [unidimensional]               | [unidimensional]      | cm/s                            |
| 10                       | 600         | 0,4              | 154,11                                  | 1,00                     | 2,33                               | 1,00                  | -0,07                          | 0,4                   | 154,11                          |
| 10                       | 600         | 0,6              | 383,71                                  | 1,00                     | 2,32                               | 1,00                  | -0,24                          | 0,6                   | 383,71                          |
| 10                       | 600         | 0,8              | 628,35                                  | 1,00                     | 2,31                               | 1,00                  | -0,32                          | 0,8                   | 628,35                          |
| 10                       | 600         | 1,0              | 838,60                                  | 1,00                     | 2,31                               | 1,00                  | -0,37                          | 1,0                   | 838,60                          |
| 10                       | 600         | 1,1              | 923,00                                  | 1,00                     | 2,31                               | 1,00                  | -0,39                          | 1,1                   | 923,00                          |
| 10                       | 600         | 1,2              | 992,05                                  | 1,00                     | 2,31                               | 1,00                  | -0,41                          | 1,2                   | 992,05                          |
| 10                       | 600         | 1,3              | 1045,84                                 | 1,00                     | 2,31                               | 1,00                  | -0,42                          | 1,3                   | 1045,84                         |
| 10                       | 600         | 1,4              | 1085,17                                 | 1,00                     | 2,31                               | 1,00                  | -0,43                          | 1,4                   | 1085,17                         |
| 10                       | 600         | 1,5              | 1111,41                                 | 1,00                     | 2,30                               | 1,00                  | -0,44                          | 1,5                   | 1111,41                         |
| 10                       | 600         | 1,6              | 1126,25                                 | 1,00                     | 2,30                               | 1,00                  | -0,45                          | 1,6                   | 1126,25                         |
| 10                       | 600         | 1,8              | 1129,57                                 | 1,00                     | 2,30                               | 1,00                  | -0,46                          | 1,8                   | 1129,57                         |
| 10                       | 600         | 2,0              | 1110,66                                 | 1,00                     | 2,30                               | 1,00                  | -0,47                          | 2,0                   | 1110,66                         |
| 10                       | 600         | 2,2              | 1082,76                                 | 1,00                     | 2,30                               | 1,00                  | -0,48                          | 2,2                   | 1082,76                         |
| 10                       | 600         | 2,5              | 1041,10                                 | 1,00                     | 2,30                               | 1,00                  | -0,49                          | 2,5                   | 1041,10                         |

## HIDRÓGENO 30 BAR 700 K

| PARÁMETROS DE DEFINICIÓN |             |                  | PARÁMETROS DE CÁLCULO                   |                          |                                    |                       |                                | PARÁMETROS DE GRÁFICA |                                 |
|--------------------------|-------------|------------------|---|--------------------------|------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Presión                  | Temperatura | Dosado relativo  | Velocidad de combustión laminar en C.R. | Relación de temperaturas | Coef. termodinámico de temperatura | Relación de presiones | Coef. termodinámico de presión | Dosado relativo       | Velocidad de combustión laminar |
| $P$                      | $T$         | $\phi$           | $u_L^0$                                 | $T/T^0$                  | $\alpha$                           | $P/P^0$               | $\beta$                        | $\phi$                | $u_L$                           |
| bar                      | K           | [unidimensional] | cm/s                                    | [unidimensional]         | [unidimensional]                   | [unidimensional]      | [unidimensional]               | [unidimensional]      | cm/s                            |
| 30                       | 700         | 0,4              | 154,11                                  | 1,17                     | 2,33                               | 3,00                  | -0,07                          | 0,4                   | 205,47                          |
| 30                       | 700         | 0,6              | 383,71                                  | 1,17                     | 2,32                               | 3,00                  | -0,24                          | 0,6                   | 423,66                          |
| 30                       | 700         | 0,8              | 628,35                                  | 1,17                     | 2,31                               | 3,00                  | -0,32                          | 0,8                   | 631,34                          |
| 30                       | 700         | 1,0              | 838,60                                  | 1,17                     | 2,31                               | 3,00                  | -0,37                          | 1,0                   | 796,25                          |
| 30                       | 700         | 1,1              | 923,00                                  | 1,17                     | 2,31                               | 3,00                  | -0,39                          | 1,1                   | 858,54                          |
| 30                       | 700         | 1,2              | 992,05                                  | 1,17                     | 2,31                               | 3,00                  | -0,41                          | 1,2                   | 907,08                          |
| 30                       | 700         | 1,3              | 1045,84                                 | 1,17                     | 2,31                               | 3,00                  | -0,42                          | 1,3                   | 942,49                          |
| 30                       | 700         | 1,4              | 1085,17                                 | 1,17                     | 2,31                               | 3,00                  | -0,43                          | 1,4                   | 965,85                          |
| 30                       | 700         | 1,5              | 1111,41                                 | 1,17                     | 2,30                               | 3,00                  | -0,44                          | 1,5                   | 978,60                          |
| 30                       | 700         | 1,6              | 1126,25                                 | 1,17                     | 2,30                               | 3,00                  | -0,45                          | 1,6                   | 982,36                          |
| 30                       | 700         | 1,8              | 1129,57                                 | 1,17                     | 2,30                               | 3,00                  | -0,46                          | 1,8                   | 969,90                          |
| 30                       | 700         | 2,0              | 1110,66                                 | 1,17                     | 2,30                               | 3,00                  | -0,47                          | 2,0                   | 941,74                          |
| 30                       | 700         | 2,2              | 1082,76                                 | 1,17                     | 2,30                               | 3,00                  | -0,48                          | 2,2                   | 908,69                          |
| 30                       | 700         | 2,5              | 1041,10                                 | 1,17                     | 2,30                               | 3,00                  | -0,49                          | 2,5                   | 863,01                          |

## GRÁFICAS

