



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

Diseño de un acceso óptico en una bomba de combustión a volumen constante y caracterización de metanol

Autor: D. Abel López Caballero

Tutor: Dña. Miriam Reyes Serrano

Valladolid, junio, 2019



Universidad de Valladolid

DISEÑO DE UN ACCESO ÓPTICO EN UNA BOMBA DE
COMBUSTIÓN A VOLUMEN CONSTANTE Y
CARACTERIZACIÓN DE METANOL



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial



Resumen

En este trabajo fin de máster se aborda el diseño de dos accesos ópticos en una bomba de combustión a volumen constante utilizada para la caracterización del proceso de combustión premezclada de diferentes combustibles. Para ello se realizarán las modificaciones necesarias en la tapa de la bomba, se diseñarán los tornillos a utilizar y se seleccionarán los materiales y las dimensiones de las juntas y el cristal. Por otro lado, se caracteriza el proceso de combustión de metanol, como combustible, a través de la determinación de su velocidad de combustión laminar, realizando para ello una validación de los ensayos realizados, y llevando a cabo un estudio paramétrico en función del dosado, temperatura y presión.

Abstract

In this master's thesis, the design of two optical accesses in a constant volume combustion pump used for the characterization of the premixed combustion process of different fuels is addressed. To do this, the necessary modifications will be made to the pump cover, the screws to be used will be designed and the materials and dimensions of the joints and the glass will be selected. On the other hand, combustion of methanol is characterized as fuel through the determination of the laminar burning velocity, performing a validation of the tests carried out for this purpose and carrying out a parametric study as a function of equivalence ratio, temperature and pressure.



Universidad de Valladolid

DISEÑO DE UN ACCESO ÓPTICO EN UNA BOMBA DE
COMBUSTIÓN A VOLUMEN CONSTANTE Y
CARACTERIZACIÓN DE METANOL



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial



Índice

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.	7
1.1 Introducción	7
1.2 Antecedentes	7
1.3 Objetivos del proyecto	8
1.4 Etapas del proyecto	9
CAPÍTULO 2: REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE.	11
2.1 Utilización de metanol como combustible.	11
2.2 Efecto de los combustibles de alcohol en las características de la combustión.	12
2.3 Métodos de determinación de la velocidad de combustión laminar.	14
2.4 Comparativa entre las velocidades de combustión laminar de la gasolina y otros combustibles alternativos.	18
CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL. MODELO DE DIAGNÓSTICO.	21
3.1 Descripción de la instalación	21
3.2 Metodología experimental. Método de la bomba a volumen constante.	24
3.3 Modelo de diagnóstico.	26
CAPÍTULO 4: MODIFICACIÓN BOMBA DE COMBUSTIÓN ESFÉRICA.	31
4.1 Diseño de los taladros a realizar.	31
4.2 Diseño de los tornillos.	35
4.3 Selección de las juntas.	37
4.4 Selección del cristal.	38
CAPÍTULO 5: RESULTADOS EXPERIMENTALES.	43
5.1 Comparación y validación de los resultados.	43
5.2 Estudio paramétrico de la velocidad de combustión laminar del metanol en función de la presión, temperatura y dosado.	50
5.3 Estudio de la morfología de las llamas de metanol en una bomba de combustión cilíndrica.	67
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.	71
6.1 Conclusiones.	71
6.2 Desarrollo de trabajos futuros.	73
6.3 Aportaciones realizadas.	74
ANEXO: PLANOS	75
BIBLIOGRAFÍA	77



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	79
ÍNDICE DE TABLAS	81



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.

1.1 Introducción

En este TFM se pretende diseñar, calcular y construir dos accesos ópticos en una bomba de combustión a volumen constante utilizada para la caracterización del proceso de combustión premezclada de diferentes combustibles, tanto gaseosos como líquidos, que se encuentra en el laboratorio de Máquinas y Motores Térmicos.

El proyecto forma parte de una línea de investigación que analiza el uso de combustibles alternativos en motores térmicos, principalmente en motores de combustión interna alternativos (MCIA) y estudia la modificación y regulación de dichos motores para su adaptación a estos combustibles. Esta línea de investigación se realiza desde la sección de Máquinas y Motores Térmicos, perteneciente al Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica (IEF) de la Universidad de Valladolid.

La bomba de combustión a volumen constante forma parte de una instalación experimental utilizada para la caracterización del proceso de combustión de combustibles líquidos y gaseosos, a través de la determinación de propiedades como la velocidad de combustión, tasa de liberación de calor, etc.

Una de las propiedades fundamentales en el proceso de combustión es la velocidad de combustión, que caracteriza y cuantifica los efectos del tipo de combustible en combustiones premezcladas. En las últimas décadas, se ha incrementado el interés por medir la velocidad de combustión laminar de combustibles gaseosos, con el objetivo de buscar combustibles que puedan ser una alternativa a los combustibles líquidos derivados del petróleo, siendo hoy en día una realidad el uso de algunos combustibles gaseosos.

Para la realización de este proyecto se parte de una instalación experimental que permite medir la velocidad de combustión laminar de una mezcla de combustibles (gaseosos o líquidos), a la cual se realiza la modificación necesaria para crear dos accesos ópticos, óptimos para el estudio y caracterización del combustible, con el fin de realizar un diagnóstico óptico del proceso de combustión a través de la quimio-luminiscencia emitida durante dicho proceso de combustión.

1.2 Antecedentes

En la misma línea de investigación que el presente TFM, se han realizado dos Tesis Doctorales, y varios proyectos anteriores dentro del propio Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica. En las Tesis Doctorales previas se realizaron accesos ópticos en la bomba de combustión que permitieron ver la utilidad de la quimioluminiscencia emitida en llamas para caracterizar el proceso de combustión. En la segunda Tesis se diseñó a mayores otra bomba de



combustión, cilíndrica, en ese caso para el estudio y detección de las imágenes del proceso de combustión.

En el primero de los proyectos se realizó un primer diseño y dimensionamiento de la bomba, dónde se realizaron todos los cálculos necesarios para el dimensionamiento de la esfera y de algunas de las piezas que van acopladas a ella. Además, se llevó a cabo el diseño y construcción de toda la línea de gases, mediante la cual se suministraría el combustible a la bomba.

Posteriormente, en otro proyecto y Tesis Doctoral, se realiza una primera modificación en la bomba para poder realizar ensayos con combustibles líquidos, pues en el diseño inicial de la bomba sólo era posible realizar experimentos con sustancias gaseosas. También se realiza un modelo de diagnóstico que permite analizar los datos de la combustión obtenidos de la instalación a fin de poder obtener los parámetros claves para la caracterización de combustibles líquidos.

Una vez finalizada la segunda modificación, en la bomba esférica de volumen constante se han caracterizado numerosos combustibles tanto en condiciones premezcladas como en procesos de autoencendido, lo cual ha derivado en, la realización de Tesis Doctorales, y diferentes publicaciones JCR relativas a las velocidades de combustión para diferentes combustibles.

1.3 Objetivos del proyecto

El Trabajo Fin de Máster que se presenta en este documento tiene como objetivo principal diseñar dos accesos ópticos en una bomba de combustión a volumen constante que se utiliza para caracterizar el proceso de combustión premezclada de diferentes combustibles. Además de este objetivo principal, se pretende caracterizar el combustible metanol en la bomba de combustión a volumen constante, determinando su velocidad de combustión en la bomba de combustión esférica.

Para ello, se realizarán las modificaciones necesarias en la cámara de combustión existente, tanto en las dimensiones de los taladros dónde se ubican los fotomultiplicadores, como en la elección de los cristales que permiten el paso de la radiación para la toma de datos. Así mismo, se realizará una simulación para una comprobación térmica y resistente, de forma que se garantice la resistencia de la cámara de combustión ante las presiones y temperatura producidas durante la combustión.

Para la caracterización de la velocidad de combustión del metanol se pretende conseguir expresiones del tipo *Metghalchi & Keck* de la velocidad de combustión laminar para distintas relaciones combustible-aire. Las curvas de presión se introducirán en un modelo de diagnóstico del proceso de combustión de dos zonas, para determinar parámetros de interés durante el proceso de combustión, como la velocidad de combustión. Las expresiones de la velocidad de combustión sirven de entrada en modelos predictivos de MCIA, que permitirán predecir el comportamiento de ese combustible en un motor en un amplio rango de presiones y temperaturas.



1.4 Etapas del proyecto

La realización de este proyecto consta de las siguientes etapas:

Una primera etapa de documentación sobre el estado actual de la cámara de combustión, mediante varios proyectos realizados por el grupo de investigación de Motores Térmicos y Energías renovables de la Universidad de Valladolid, con el objetivo de conocer el diseño primitivo de la bomba, así como su funcionamiento y los objetivos de su realización.

Una segunda etapa de revisión bibliográfica sobre trabajos de diferentes autores acerca de las velocidades de combustión en bombas similares, con el objetivo de tomar ciertas referencias de presión y temperatura, que sirvan como validación de los experimentos que se realizarían posteriormente.

Una tercera etapa de realización de experimentos con combustible líquido. En esta ocasión se buscará la caracterización del metanol para diferentes presiones y temperaturas, así como la caracterización de dicho combustible a 1 bar de presión, mediante un barrido de dosado, con el fin de validar la veracidad de nuestros resultados en comparación con los realizados por otros autores.

En paralelo a lo anterior, se lleva a cabo una etapa de diseño de las modificaciones necesarias en la cámara de combustión, y del acceso óptico que mejorase el montaje existente, tanto para una mejor lectura, como para un acceso más limpio en caso de necesidad de sustitución del elemento óptico. Una vez diseñadas las modificaciones, se realizará una simulación de las presiones y temperaturas propias de la combustión dentro de la cámara, con el objetivo de comprobar que, a pesar de las modificaciones realizadas, la instalación soportaría dichos esfuerzos. Así mismo se diseñarán los nuevos tornillos a incorporar, y se hará un estudio y selección de los materiales de los componentes necesarios para su implantación.

Finalmente, una última etapa de búsqueda de talleres que puedan llevar a cabo las modificaciones necesarias en la tapa de la bomba.



Universidad de Valladolid

DISEÑO DE UN ACCESO ÓPTICO EN UNA BOMBA DE
COMBUSTIÓN A VOLUMEN CONSTANTE Y
CARACTERIZACIÓN DE METANOL



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial



CAPÍTULO 2: REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE.

En este capítulo se expondrán las causas de la elección del metanol como combustible, realizando una investigación sobre los diferentes trabajos publicados para la determinación de la velocidad de combustión laminar con la utilización del metanol como combustible, así como los efectos que provoca la utilización de alcoholes en las características de la combustión y en las emisiones producidas.

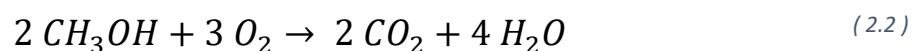
2.1 Utilización de metanol como combustible.

A medida que la demanda de energía aumenta cada año, la importancia de encontrar alternativas a la quema de combustibles fósiles ha ido aumentando considerablemente en los últimos años. Uno de los grandes aspectos en los que se han realizado numerosas investigaciones debido a su gran poder energético es la combustión, intentando encontrar la mejor eficiencia y la menor contaminación posible. Una de las vías abiertas en creciente investigación y desarrollo es la combustión de biocombustibles. Los biocombustibles se caracterizan por ser dióxidos de carbono renovables y razonablemente neutrales ya que están hechos a partir de material orgánico. Ya que absorben tanto dióxido de carbono durante su crecimiento, como el que se presenta en la combustión de los mismos, el ciclo biológico se puede considerar de carbono neutral, convirtiéndose por estos motivos en combustibles muy populares. Una gran cantidad de investigaciones se han realizado en torno al metanol, siendo ya una alternativa a la gasolina y el diésel. El amplio uso del metanol como combustible motiva la investigación en relación con sus características de combustión.

En primer lugar, es necesario conocer la química básica del metanol. El metanol CH_3OH , es el alcohol más simple y se encuentra en estado líquido a temperatura ambiente. Se crea a partir de gas natural o biomasa. En el último caso, la gasificación de la biomasa conduce a monóxido de carbono y monóxido de hidrógeno que con un catalizador se consigue formar metanol:

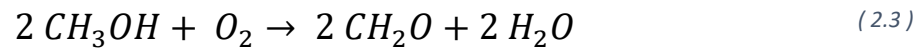


Cuando el metanol se quema, se oxida a través del formaldehído para convertirse en dióxido de carbono y agua:

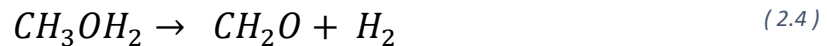




El formaldehído CH_2O , es el más simple de los aldehídos. Es estable a $80-100^\circ C$, pero se polimeriza en paraformaldehído a temperatura ambiente. Una gran cantidad de formaldehído se usa en síntesis, pero también se usa puro como conservante y desinfectante. El formaldehído es altamente tóxico para los seres humanos y animales y es presumiblemente cancerígeno. El formaldehído se crea principalmente por la oxidación del metanol con un catalizador presente, generalmente plata o una mezcla de óxido de hierro y molibdeno o vanadio:



Otra forma común de producir formaldehído es por deshidrogenación: [1]



Otra alternativa interesante para su uso combustible es el etanol, que comparte muchas características con el metanol, más concretamente en los sistemas de combustión. Ambos son impulsados por números de octanaje similares, calores muy altos de vaporización y bajas relaciones aire-combustible. Como consecuencia de esto, y debido a su creciente popularidad y uso como biocombustible, a menudo hay datos más recientes sobre el rendimiento del etanol en motores. Debido a la similitud de ambas moléculas, se pueden mezclar con la gasolina, existiendo reglas de mezcla que esencialmente significan que se pueden crear combustibles de entrada. La similitud del metanol con el etanol es útil cuando se intenta predecir el rendimiento del motor en los sistemas de combustión, pero existe una diferencia que resulta muy útil en términos de mitigación de gases de efecto invernadero. El metanol, como se ha explicado antes, se fabrica convencionalmente a partir de fuentes fósiles, pero dado que puede estar hecho de cualquier elemento que contenga carbono por medios termoquímicos, es posible que, a diferencia del etanol, se podría fabricar a partir de materias primas biogénicas. Por tanto, la producción de metanol es más fácilmente escalable, pudiéndose incorporar con plantas de bioetanol para aumentar el rendimiento energético total de la materia prima que ingresa al proceso [2].

2.2 Efecto de los combustibles de alcohol en las características de la combustión.

En este apartado se expondrá el impacto de los combustibles de alcohol y éter en las características de combustión de un motor de encendido por chispa, entre los que se incluyen la temperatura del cilindro (CT), la presión efectiva media del freno (BMEOP), la tasa de

liberación de calor (ROHR), la tasa de aumento de la presión (ROPR), quema en masa (FMB), la presión del cilindro (CP), duración de la combustión (DC), velocidad de la combustión (CS), la velocidad de la llama (FS), la eficiencia de la combustión (CE), y el antibloqueo (AK).

En general, los combustibles a base de alcohol y éter tienen un impacto real en la combustión de motores con encendido por chispa, debido al alto contenido en oxígeno y al único punto de ebullición. Además, el alcohol y el éter tienen alrededor de un 30% menos de valores energéticos que la gasolina. El alcohol y el éter son combustibles oxigenados que permiten una combustión completa, proporcionando una mayor eficiencia en motores de aspiración natural. Evidentemente, el tipo de combustible utilizado en el motor de encendido por chispa afecta directamente la estructura y la velocidad de la llama dentro de la cámara de combustión.

El desarrollo y la propagación de la llama son dos parámetros significativos que afectan la combustión y la eficiencia térmica de un motor. La duración es la distancia entre el inicio de la chispa, llamado inicio de la combustión, y el 10% de liberación de calor o la fracción de masa quemada. Esta duración puede tener efectos negativos y positivos en la eficiencia del motor. El periodo denominado duración de propagación de llama describe la duración del 10-90% de la liberación de calor o fracción de masa quemada. Esta duración es un parámetro significativo que se utiliza para determinar la velocidad de combustión y la eficiencia de la combustión.

En general, una pequeña porción de alcohol aditivo de combustible en la gasolina proporciona una duración más corta del desarrollo de la llama y una combustión más rápida que la gasolina. Esto lo podemos comprobar posteriormente pues se compararán los resultados obtenidos en los experimentos realizados para determinar la velocidad de combustión laminar en mezclas metanol-aire, con los datos de velocidad de combustión laminar para la gasolina obtenidos de la bibliografía.

La siguiente tabla recoge los efectos de diferentes alcoholes, ya sean puros o en mezcla con gasolina, en las diferentes características de la combustión anteriormente mencionadas: [3]

Tipo de alcohol	Relación de mezcla	CE	ROHR	ROPR	CT	CP	CD	FS	CS	AK	FMB
Etanol-Metanol	E100-M100	↑	↓			↓	↓	↑	↑	↑	
Etanol	E20,E40,E60,E84						↓	↓		↑	↑
Etanol	E100	↑			↓	↑	↓	↑	↑	↑	
Butanol	B100	↓				↑	↓			↑	↑
Metanol	M20,M70		↑		↓	↑	↓			↑	
Metanol	M100	↑				↑		↑			↑

Tabla 2.1. Efectos de los alcoholes en la combustión. [3]

También es necesario resaltar los efectos que provoca el uso de alcoholes como combustibles en las emisiones a la atmósfera en motores de encendido por chispa.



Para combustibles con bajo contenido en etanol (5-15%), las emisiones en óxidos de nitrógeno (NO_x) se incrementan alrededor de un 16% al aumentar la proporción de mezcla, mientras que las emisiones de hidrocarburos (HC), se reducen en torno a un 40% [4]. En mezclas de etanol y metanol, las emisiones de NO_x se incrementan con respecto las de la gasolina. En cambio, las emisiones de HC se reducen [5].

Para el butanol, independientemente de la concentración de butanol en la mezcla, se reducen considerablemente las emisiones tanto de NO_x como de HC [6].

Por otra parte, atendiendo a las emisiones de monóxido y dióxido de carbono, CO y CO_2 , las mezclas con baja concentración de etanol (5-10%), se reducen las emisiones contaminantes alrededor de un 45% en CO, y un 7.5% en CO_2 [4].

Si el combustible utilizado es el metanol, se reducen las emisiones de CO y CO_2 con respecto a las producidas por la gasolina, y estas emisiones se reducen aún más en mezclas de metanol y etanol [5].

Con el butanol, es diferente la emisión de productos contaminantes a la atmósfera dependiendo de la concentración de butanol. Para mezclas de butanol-gasolina disminuyen las emisiones de CO, mientras que, para combustiones de butanol puro, aumentan las emisiones en comparación con la gasolina [6].

2.3 Métodos de determinación de la velocidad de combustión laminar.

La velocidad de combustión laminar es un parámetro importante que se utiliza en la validación de los mecanismo cinético-químicos, la estimación de las velocidades de combustión turbulentas y estudios de la estructura de la llama.

Varios métodos, tales como el quemador Bunsen, el método del quemador de llama plana, el método del tubo transparente, el método de la bomba a volumen constante o el método del flujo a contracorriente, han sido utilizados por los investigadores para medir la velocidad de combustión laminar en mezclas metanol-aire [7].

Hay una falta de datos de velocidad de combustión laminar a presiones y temperaturas elevadas, y, además, sólo unos pocos investigadores estudiaron el efecto de los residuos.

Los primeros estudios de la velocidad de combustión laminar en mezclas metanol-aire se realizaron en torno a 1950. Se usó el método del tubo horizontal para medir la velocidad de combustión laminar, lo que normalmente conduce a una subestimación de la velocidad de combustión debido a una sobrestimación del área de la llama y el efecto de la pared de enfriamiento rápido. [8].

Posteriormente, *Gibs & Calcote* [9] utilizaron el quemador Bunsen para llevar a cabo las mediciones de la velocidad de combustión en condiciones atmosféricas. La compleja geometría



de la llama en estos quemadores hace que sea difícil estimar el área de la llama. El primer estudio en reportar velocidades laminares de combustión de metanol a presiones y temperaturas elevadas fue el de *Ryan & Lestz* [10]. Se usó una bomba de volumen constante para realizar las combustiones en una relación estequiométrica metanol-aire, para unas presiones comprendidas entre 0.4 y 18 bar. Además, utilizaron un diluyente inerte no especificado en concentraciones de hasta el 30% en masa, para investigar el efecto de los gases residuales e informaron de una disminución lineal en la velocidad de combustión laminar al aumentar la concentración de diluyentes. La velocidad de combustión se obtuvo utilizando solo la variación de presión registrada en el interior de la cámara de combustión con un modelo termodinámico de dos zonas (zona de sin quemados y zona de quemados) suponiendo un espesor del frente de llama insignificante. La velocidad laminar S_u se ajustaba a expresiones de la siguiente forma:

$$S_u = b_1 * p^{b_2} * e^{\left(-\frac{b_3}{T_u}\right)} \quad (2.5)$$

donde p y T_u son la presión y la temperatura de mezcla de los sin quemados. Las constantes b_1 , b_2 y b_3 son dependientes de la composición de la mezcla.

Metghalchi & Keck [11] también utilizaron la técnica de la bomba a volumen constante. La bomba de combustión tenía un diámetro interior de 15.24 cm. Las presiones de los gases se midieron con medidores Bourdon calibrados contra un medidor de peso muerto. Las presiones del combustible se midieron con un manómetro de mercurio que podía calentarse hasta 400 K para evitar la condensación de los componentes de baja presión de vapor de los combustibles mezclados. Los aumentos dinámicos de presión dentro de la bomba durante la combustión se midieron con un transductor de presión piezoeléctrico recubierto con grasa de alto vacío para reducir su sensibilidad térmica. Se asumió que el transductor de presión era lineal y se obtuvo un punto de calibración a alta presión durante cada ejecución utilizando un indicador de presión equilibrada. La simetría esférica y el centrado del frente de llama se verificaron mediante tres sondas de ionización que midieron el tiempo de llegada de la llama a la pared.

Para introducir los combustibles puros de metanol e isoctano en el interior de la cámara, las mezclas de combustible y aire podrían prepararse utilizando el método de presiones parciales o usando una jeringa calibrada para inyectar la cantidad deseada de combustible líquido en la bomba a través de un filtro de silicona. La manera de proceder para realizar una medición, la bomba se calentó primero a la temperatura deseada, para ello se usaron cuatro termopares en varios lugares estratégicos de la bomba. Luego, se introdujo el combustible y se esperaron 5 minutos para que el sistema alcanzara el equilibrio térmico a la presión deseada. El manómetro de presión de combustible se cerró posteriormente y se introdujeron aire y gases diluyentes para producir la mezcla en las condiciones deseadas. De nuevo, se esperó 5 minutos para que se amortiguaran los movimientos y el sistema llegara a un equilibrio térmico. Una vez completado el procedimiento de llenado, el transductor de presión se puso a cero y la mezcla se encendió. Las señales analógicas del transductor de presión se envían a un microordenador y los datos digitalizados se transfirieron automáticamente desde el microordenador a la computadora para

su análisis. Las señales de la sonda de ionización utilizadas para determinar los tiempos de llegada a la pared se registraron por separado mediante relojes digitales y el operador se introdujo en la computadora central.

Los experimentos realizados para medir las velocidades de combustión laminar se llevaron a cabo en un amplio rango de presiones (0.4 a 40 bar) y temperaturas (298 a 700K). El modelo termodinámico utilizado es similar al utilizado por *Ryan & Lestz*. El ajuste se realizó mediante una curva del siguiente tipo:

$$S_u = S_{u0} * \left(\frac{T_u}{T_{u0}}\right)^\alpha * \left(\frac{p}{p_0}\right)^\beta \quad (2.6)$$

donde p_0 , T_{u0} y u_{10} , son la presión, la temperatura del gas no quemado, y la velocidad de combustión laminar en condiciones de referencia atmosféricas. Los exponentes de presión y temperatura, β y α respectivamente, están dados por funciones lineales en función del dosado.

Además, estos autores utilizaron una mezcla de 15% de CO_2 y 85% N_2 para simular el efecto de los residuos en concentraciones de hasta un 20% en masa. De esta manera, la ecuación anterior queda de la siguiente manera, siendo f la cantidad de residuos en % en masa:

$$S_u = S_{u0} * \left(\frac{T_u}{T_{u0}}\right)^\alpha * \left(\frac{p}{p_0}\right)^\beta * (1 - 2.1f) \quad (2.7)$$

Gulder [12] realizó un amplio estudio de la velocidad de combustión laminar de iso-octano, metanol, etanol y sus mezclas bajo condiciones de un motor. Para ello utilizó una bomba esférica para llevar a cabo las combustiones, utilizando sondas de ionización de llama. *Gulder* ha correlacionado sus resultados utilizando una expresión similar a la utilizada por *Metghalchi & Keck*. En este caso, para la velocidad de combustión laminar a temperatura ambiente, se usa una forma exponencial en lugar de la expresión de segundo orden más simple empleada por *Metghalchi & Keck*. El exponente de temperatura de *Gulder*, α , es una constante en lugar de una función del dosado Fr . Esto, conduce a una reproducción incorrecta de del efecto de la temperatura del gas no quemado en la velocidad de combustión para una relación de dosado variable.

Cabe mencionar que ninguno de los tres estudios mencionados anteriormente, tuvo en cuenta la posibilidad de inestabilidades en el avance del frente de llama, por lo que pudo conducir a errores considerables en las velocidades de combustión laminar reflejadas.

Egolfopoulos et al [13] utilizan un quemador de doble llama en contracorriente para medir la velocidad de combustión laminar de diversos hidrocarburos, incluyendo metanol y etanol a temperaturas comprendidas entre 316 y 370K, para un amplio rango de relaciones de dosado

(0.5-2). Ellos fueron los primeros en tener en cuenta el efecto del estiramiento de llama. Debido a que la tasa de deformación más corriente en sus llamas es bastante pequeña (aproximadamente 100s^{-1}), usaron una extrapolación lineal para eliminar el efecto del estiramiento de llama. Esta extrapolación lineal conduce a una sobreestimación de la velocidad de combustión entre el 5 y el 10%.

Más recientemente, *Saed & Stone* [14] emplean un modelo termodinámico de zona múltiple de quemados para encontrar la relación entre la fracción de masa quemada y el aumento de presión registrado durante las combustiones. El aparato experimental utilizado es una bomba esférica de 160 mm de diámetro. El metanol se inyecta a través de un inyector de solenoide, llevando a cabo dos controles independientes de la relación aire-combustible (Fr), midiendo también la presión y la temperatura en el interior del recipiente antes y después de la adición del combustible. Para la medida de la presión se utilizó un transductor de presión piezorresistivo calibrado frente a un manómetro de mercurio. Después de la combustión, se utiliza una sonda Lambda para comprobar la relación aire-combustible. Estudiaron la velocidad de combustión para presiones de hasta 13.5 bar, observando estructuras de llama celulares a presiones por encima de los 6 bar, y, en consecuencia, se eliminan estos puntos de llama celulares en su registro de datos de velocidades de combustión laminar. Los valores aceptados se ajustaron utilizando una ecuación similar a la de *Metghalchi & Keck*. La siguiente ecuación muestra la dependencia de la velocidad laminar en relación con la presión, temperatura, y relación aire-combustible:

$$S_u = [S_{u0} + S_{u1}(Fr - 1) + S_{u2}(Fr - 1)^2 + S_{u3}(Fr - 1)^3 + S_{u4}(Fr - 1)^4] \left[\left(\frac{T_u}{T_{u0}} \right)^\alpha * \left(\frac{p}{p_0} \right)^\beta \right] \quad (2.8)$$

dónde: S_{u0} , S_{u1} , S_{u2} , S_{u3} , S_{u4} , α y β , son coeficientes.

Liao et al. [15], [16] investigaron las propiedades de propagación de llama de metanol y etanol, utilizando una cámara de combustión a volumen constante en el que el crecimiento de la llama fue captado por una cámara de alta velocidad y un sistema óptico de Schlieren. Para corregir sus medidas debido al estiramiento de llama, sugieren una relación lineal entre la velocidad de la llama y la llama que se extiende, siguiendo una idea de Markstein:

$$S_l - S_n = L_b * \alpha \quad (2.9)$$

donde S_l y S_n son la velocidad de llama sin estirar y estirada respectivamente, y α es el tramo de llama, que está definido por llamas esféricas.



Realizaron estudios para una gama de temperaturas entre 358-400K a presión atmosférica, ajustando los resultados de forma idéntica a *Metghalchi & Keck*.

Zhang et al. [17] empleó el mismo aparato y metodología para sus estudios de velocidad de combustión laminar, utilizando mezclas de metanol-aire a presiones de 7.5 bar. Utilizaron N₂ para simular la presencia de gases residuales en concentraciones de hasta 15% en masa. Este uso de N₂ podría llevar a una subestimación del efecto de los residuos, ya que la capacidad calorífica del N₂ puede ser más de un 10% inferior a la de los productos de la combustión del metanol existentes en las condiciones del motor.

Veloo et al [18] recientemente repiten las mediciones de *Egolfopoulos et al.* en mezclas metanol-aire y etanol-aire bajo un conjunto restringido de condiciones. Usaron el quemador de doble llama en contracorriente en combinación con un método de velocimetría de imagen de partículas. Esta vez, la velocidad de combustión laminar sin estirar se derivó usando un enfoque de extrapolación no lineal basado en simulaciones numéricas directas en los experimentos. Esto condujo a una sobreestimación reducida de la velocidad de combustión medida en comparación con la extrapolación lineal utilizada por *Egolfopoulos et al.*

2.4 Comparativa entre las velocidades de combustión laminar de la gasolina y otros combustibles alternativos.

Las emisiones de los motores se han convertido en el foco de una cantidad considerable de investigaciones. Para los motores de combustión interna de gasolina, se pueden identificar dos técnicas de combustión diferentes.

La primera de ellas es el motor de encendido por chispa convencional, en el cual una mezcla de combustible y aire se enciende mediante una chispa y la combustión se produce con la propagación de la llama a través del cilindro. Una comprensión profunda de la transición del núcleo laminar al de la llama turbulenta y de la propagación de la llama turbulenta es esencial para el diseño de motores más eficientes, habiéndose demostrado que la velocidad de combustión laminar es un parámetro muy importante para estos fenómenos. Además, el autoencendido de la mezcla en un motor de combustión interna de encendido por chispa, es un evento indeseable que restringe la máxima relación de compresión de operación y, en último lugar, la eficiencia termodinámica del motor.

La segunda tecnología es el concepto de encendido por compresión de carga homogénea (HCCI). Estos motores HCCI son de especial interés debido a su potencial para reducir las emisiones NO_x y hollín y su mayor eficiencia térmica en comparación con los motores de encendido por chispa. El rendimiento de los motores HCCI se basa en un control preciso del tiempo de autoignición de la mezcla. La simulación de la química de combustión de los HCCI requiere la capacidad de predecir con precisión el comportamiento de autoignición del combustible a altas presiones y bajas temperaturas, junto con la predicción precisa de la propagación de la llama. Por lo tanto, una descripción precisa de los fenómenos químicos que



ocurren tanto en la combustión homogénea como en las configuraciones de llama es esencial en la simulación de un motor de combustión interna, ya sea de encendido por chispa o HCCI. [19]

En este momento, se pretende comparar las velocidades de combustión laminar obtenidas en los experimentos realizados en el laboratorio con metanol como combustible, con los datos obtenidos por otros autores utilizando combustibles de referencia primarios (PRF), como la gasolina. También se compararán con ensayos realizados con Iso-octano y n-Heptano. Todos los experimentos se han realizado en las mismas condiciones de presión y temperatura, 1 bar y 300 K respectivamente.

PRF 85, Huang et al. 2004 [20]		PRF 90, Huang et al. 2004 [20]		PRF 95, Huang et al. 2004 [20]	
<i>LBV</i>	<i>Fr</i>	<i>LBV</i>	<i>Fr</i>	<i>LBV</i>	<i>Fr</i>
0,18	0,70	0,18	0,70	0,17	0,70
0,24	0,80	0,25	0,80	0,26	0,80
0,30	0,90	0,30	0,90	0,29	0,90
0,31	1,00	0,32	1,00	0,31	1,00
0,33	1,10	0,33	1,10	0,32	1,10
0,31	1,20	0,32	1,20	0,31	1,20
0,28	1,30	0,26	1,30	0,27	1,30
0,23	1,40	0,22	1,40	0,21	1,40
Iso-Octano, Davis et al. 1998 [21]		n-Heptano, Davis et al. 1998 [21]		Presente trabajo	
<i>LBV</i>	<i>Fr</i>	<i>LBV</i>	<i>Fr</i>	<i>LBV</i>	<i>Fr</i>
0,16	0,70	0,21	0,70	0,14	0,70
0,22	0,80	0,26	0,80	0,24	0,80
0,28	0,90	0,35	0,90	0,33	0,90
0,33	1,00	0,38	1,00	0,40	1,00
0,34	1,10	0,40	1,10	0,47	1,10
0,33	1,20	0,38	1,20	0,44	1,20
0,29	1,30	0,33	1,30		
0,22	1,40	0,26	1,40		

Tabla 2.2. VCL para diferentes combustibles.

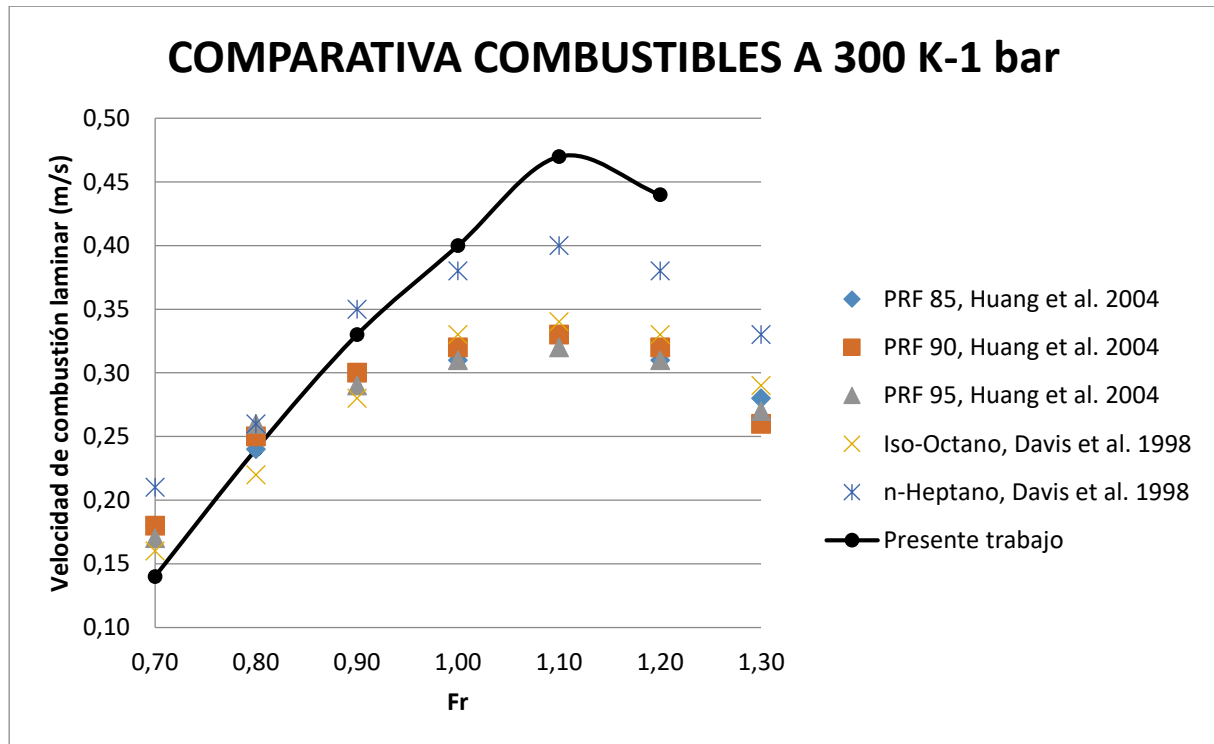


Figura 2.1. Comparativa velocidad de combustión laminar de diferentes combustibles

Como se puede observar en la gráfica anterior, para dosados pobres, las velocidades de combustión laminar para la gasolina, son prácticamente iguales, independientemente del octanaje del combustible, y para dosados bajos, ($Fr=0.7-0.8$), son superiores que las de metanol, sin embargo, a medida que se aumenta la relación combustible-aire, el metanol posee una velocidad de combustión superior a la de la gasolina, y también a las mezclas Iso-octano-aire y n-heptano-aire.

Es por esto que el metanol se empezó a utilizar como combustible para vehículos durante la década de 1930, reemplazando a la gasolina en motores de alto rendimiento. Una característica del metanol, es la baja emisión de los gases de escape, Debido a su menor punto de ebullición, el combustible se evaporará más rápido y esto, es una gran ventaja para la combustión del motor y, por tanto, se reducirán las emisiones de hidrocarburos. Además, el alto contenido de oxígeno del metanol y su estructura química simple pueden conducir a menores emisiones y una mejor combustión del motor en los motores de encendido por chispa [4].



CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL. MODELO DE DIAGNÓSTICO.

3.1 Descripción de la instalación

La descripción de la situación de partida de la instalación, se explica en varios proyectos difundidos con anterioridad por el propio grupo de investigación de Motores Térmicos y Energías renovables de la Universidad de Valladolid. En este capítulo, se realizará una breve descripción del estado de la instalación, así como de sus principales componentes con el objetivo de comprender las modificaciones llevadas a cabo en capítulos posteriores. Así pues, la instalación consta de tres partes principales:

a) Bomba esférica a volumen constante:

Es el elemento principal de la instalación, construida en acero inoxidable. Es una cámara de combustión esférica, de volumen constante, con un diámetro interior de 200 mm. Está preparada para soportar presiones máximas de 150 bar, y temperaturas de hasta 400°C. Consta de una base y una tapa de acero inoxidable que se atornilla a la base.

La base de la bomba, consiste en un cilindro de 360mm de diámetro y 140mm de alto, en cuyo interior se encuentra mecanizada una cavidad semiesférica, de 200 mm de diámetro, generando la semiesfera interior de la cámara de combustión. El resto de detalles que la conforman son los siguientes:

- Dos pequeños orificios opuestos entre sí, que comunican la cámara de combustión con el exterior. Por uno se introducen los gases de mezcla y por el otro se sacan los gases producidos durante la combustión.
- Un taladro ciego con el eje vertical de la esfera, donde se rosca una varilla, y que hace las veces de electrodo de tierra.
- Alojamiento de forma anular para la junta situado en la cara superior, concéntrico y exterior a la cavidad semiesférica.
- Dieciocho taladros verticales para atornillar la tapa, distribuidos uniformemente a lo largo de una circunferencia.
- Cuatro orificios exteriores, donde se alojan las resistencias que calientan la bomba.
- Cuatro taladros ciegos en la cara inferior que permiten suspender el conjunto mediante pernos sobre la mesa donde va anclado. Así, se puede colocar una cara de aislante térmico bajo la bomba.



Figura 3.1. Base de la bomba en la instalación existente

La tapa de la bomba, tiene en su exterior la forma semiesférica del recinto que engendra. Dispone de un espesor mínimo de 20 mm. El resto de detalles que la conforman son los siguientes:

- Orificio roscado y pasante en el eje vertical, donde se coloca la bujía.
- Orificio roscado y pasante de eje radial, a 60° con el eje vertical donde se sitúa el captador de presión piezoeléctrico, que registra las variaciones instantáneas de presión.
- Orificio roscado y pasante de eje radial, a 30° del eje vertical y opuesto al anterior, donde va situado el termopar que registra la temperatura de la mezcla.
- Saliente de forma anular para aprisionar la junta situado en la cara inferior.
- Dieciocho taladros verticales para atornillarla a la base, distribuidos uniformemente a lo largo de una circunferencia.
- Orificio para el conjunto válvula-adaptador con ángulo de inclinación 30° respecto a la vertical para facilitar la maniobrabilidad. Para introducir el combustible líquido se utilizan jeringuillas provistas de agujas epidurales de gran longitud.
- Dos orificios excéntricos sobre el eje vertical de la esfera, uno horizontal, y otro en posición radial, es decir, apuntando al centro de la esfera, con una inclinación de 30° , sobre los que irán situados los fotomultiplicadores para el estudio quimioluminiscente.



Figura 3.2. Tapa de la bomba en la instalación existente.

b) Línea de gases:

Formada por los distintos conductos, válvulas, reguladores, etc, que permiten manipular los gases de la mezcla para transferirlos de forma segura hasta la bomba. Los gases que se pueden introducir en la bomba son CH_4 , H_2 , CO_2 , N_2 , CO y aire. Cada uno de estos gases se encuentra almacenado puro en una botella a alta presión, cada una de las cuales dispone de un regulador de presión. El motivo de la elección de estos gases es porque son el producto de la gasificación de residuos biomásicos lignocelulósicos, que fue el primer estudio para el que se llevó a cabo la instalación. El aire también se puede extraer de la línea de aire comprimido de la instalación de la escuela.

La introducción de estos gases en la bomba se realiza de uno en uno mediante el método de las presiones parciales.

c) Instrumentación:

Formada por los captadores, sensores, controladores, adquisición de datos, etc... que son necesarios para el correcto funcionamiento de la instalación.

Las dos variables fundamentales a controlar en una mezcla son la presión y la temperatura. La presión en el interior de la cámara se mide durante dos etapas del experimento: una primera etapa durante la síntesis de mezcla, y otra en la etapa de combustión. Estas medidas se realizan mediante un transductor de presión piezoeléctrico que puede medir en un rango de 0 a 200 bar, soportando sobrecargas de hasta 250 bar.

El control de temperatura se realiza con la ayuda de un termopar introducido en una carcasa de acero que lo protege de las altas presiones y temperaturas que se generan en el interior de la cámara durante la combustión. Es un termopar de clase J, lo que lo hace válido hasta temperaturas de 500°C . Para llevar a cabo experimentos a una temperatura inicial mayor que la temperatura ambiente se precisa de un sistema de calentamiento de la esfera que en este caso está compuesto por cuatro resistencias eléctricas de 1kW de potencia cada una embebidas en la base de la esfera y repartidas uniformemente cada 90° . El calentamiento de la esfera está



comandado por un controlador PID que posee un display donde se muestra la temperatura objetivo que se introduce manualmente y la temperatura en la cámara.

El sistema de encendido para producir el encendido forzado en el centro de la cámara de combustión está formado por un cargador de baterías que se emplea como fuente de alimentación de 12 V de corriente continua, una bobina, un par de electrodos entre los que salta la chispa y un interruptor para provocar la misma. El electrodo de tierra es una varilla de 3 mm de diámetro que está roscada en el punto inferior de la cámara y se eleva verticalmente justo hasta el centro de la misma. El electrodo positivo, es una bujía de automoción a la que se realizaron una serie de operaciones de mecanizado con el fin de adaptarla a las necesidades del experimento. Estas operaciones de conformado fueron el corte de la rosca de la bujía, con el objetivo de que el extremo de ésta quede lo suficientemente alejada de la punta del electrodo y evitar así que salte la chispa en este punto, cortar un trozo de la punta del aislante con el fin de dejar al descubierto una longitud de electrodo positivo de 2.5 a 3 mm, necesarios para llevar a cabo la posterior operación de roscado y finalmente mecanizar una rosca en la punta del electrodo positivo, que permita roscarla a un hembrón, el cual llevará roscado por la otra cara una varilla cuya longitud se podrá variar con el propósito de conseguir la distancia entre electrodos en el centro de la esfera que sea necesaria.

Se dispone igualmente de un circuito para el disparo del trigger con el que se pretende simultanear de forma automática el salto de la chispa con el inicio de adquisición de la presión en la cámara de combustión. Finalmente, la adquisición de datos se hace a través de una tarjeta de adquisición conectada en un PC o bien mediante el registro directo en un osciloscopio y su posterior volcado a un PC. Para la conexión de los distintos sensores a sus correspondientes canales en la tarjeta, se dispone de un módulo de conexiones externo [22] .

3.2 Metodología experimental. Método de la bomba a volumen constante.

De todos los posibles métodos que se podían haber desarrollado, se decidió por utilizar el método de la bomba a volumen constante. La principal diferencia entre unos métodos experimentales y otros, radica en que en algunos de ellos la llama permanece estacionaria mientras que en otros el frente de llama se desplaza respecto de un sistema de referencia fijo [22] .

En este método de la bomba a volumen constante, la mezcla de combustible es encendida en el centro de una esfera rígida. A medida que la llama progresa, la expansión del gas quemado produce un incremento de presión y temperatura del mismo, como consecuencia de una compresión adiabática. Este incremento de temperatura provoca que la velocidad de llama crezca continuamente desde el centro hasta la pared. Es conveniente señalar que la

velocidad de combustión se puede entender como la diferencia entre la velocidad de propagación de la llama menos un término representativo de la expansión de los gases quemados que se puede denominar como término de arrastre:

$$u_{CL} = u_f - u_{arr} \quad (3.1)$$

De esta forma, se mide simultáneamente el tamaño del frente esférico de los gases quemados y la presión en la esfera para poder determinar la velocidad de llama laminar, mediante la siguiente expresión:

$$u_{CL} = \frac{dr}{dt} - \frac{R^3 - r^3}{3 * p * \gamma_u * r^2} * \frac{dp}{dt} \quad (3.2)$$

Donde:

- $\gamma_u = \frac{c_p}{c_v}$, para gases inquemados
- p es la presión para un tiempo t
- R es el radio de la esfera
- r es el radio instantáneo del frente de llama esférico.

Una alternativa para este método es utilizar la velocidad de cambio de la fracción másica “Y” del gas quemado:

$$u_{CL} = \frac{1}{3} * \frac{R^3}{r^2} * \left(\frac{p_i}{p}\right)^{\frac{1}{\gamma_u}} * \frac{dY}{dt} \quad (3.3)$$

Donde p_i es la presión inicial. Para pequeños valores de Y , se puede asumir:

$$Y = \frac{p - p_i}{p_e - p_i} \quad (3.4)$$

donde p_e es la presión correspondiente a la combustión en un volumen constante y puede ser calculada teóricamente [23] .

Para medir la velocidad de combustión, no se suele usar ninguna de las dos expresiones, sino que para ello se encuentran dos metodologías:



- 1- La primera metodología es en la que se pensó a la hora de confeccionar la instalación vigente, cuyo procedimiento consiste en medir el registro de la presión frente al tiempo y mediante un modelo de diagnóstico de dos zonas, calcular la velocidad de combustión.
- 2- La segunda metodología utiliza una expresión de la velocidad de combustión laminar en función del número de Markstein y del número de Karlovitz o en función de la longitud de Markstein, cuyo valor de entrada es la velocidad del frente de llama por radios del área del frente de llama pequeños (en la que a partir del frente de llama se puede obtener con facilidad la velocidad de combustión laminar), mediante el registro con cámaras de alta velocidad.

Algunas de las ventajas de este método son:

- Permite medir la velocidad de combustión para cualquier mezcla combustible-aire (para dosado no muy pobres) y a cualquier presión y temperatura.
- Con este método se obtiene una gran exactitud en la obtención de una mezcla de gases determinada (llenado por presiones parciales) y en la medida de la velocidad de combustión laminar, siendo el método más utilizado en la actualidad.

Sin embargo, este método de la bomba a volumen constante también presenta algunas desventajas:

- La utilización de cámaras de alta velocidad, aunque hacen el método más preciso y con facilidad de obtención de la velocidad de combustión, complican el diseño de la cámara debido a la necesidad de instalar cristales de cuarzo para soportar las elevadas presiones, lo que encarece el método.
- Para ambos casos los frentes de llama dentro de la esfera no van a ser esféricos debido a la interacción de los distintos elementos interiores con el frente de llama. Por ello, el registro de la presión se realiza en un plano lo más perpendicular posible al plano en el que estén colocados el resto de los elementos [22].

3.3 Modelo de diagnóstico.

Una de las propiedades que marca la evolución de la combustión de un combustible determinado o una mezcla de combustibles, es la variación de la presión en el transcurso de la combustión. Gracias a este tipo de curvas, es posible obtener valiosa información sobre las magnitudes relativas asociadas al proceso de combustión.

Por este motivo, se desarrolló un modelo matemático, entendiéndose como el conjunto de ecuaciones que gobiernan la conducta termodinámica y fluidomecánica en el interior de la bomba de combustión, que intenta simular los procesos físico-químicos que tienen lugar en el seno del volumen de la bomba durante un determinado experimento a partir del registro de la presión de combustión.



Para entender mejor el modelo desarrollado, es conveniente realizar una clasificación de los modelos matemáticos utilizados para simular la combustión atendiendo a dos criterios distintos:

1. Clasificación según las coordenadas espaciales utilizadas:

- Modelos dimensionales
 - a) Modelos 3D: Se resuelve en las tres coordenadas espaciales.
 - b) Modelos 2D: Se resuelve en dos coordenadas espaciales suponiéndose que no existe influencia de la tercera coordenada.
 - c) Modelos 1D: El problema se resuelve suponiendo que sólo tiene influencia una coordenada espacial.
- Modelos no dimensionales
 - a) Modelos termodinámicos o de zonas cero-dimensionales: Basado en ecuaciones termodinámicas, distinguiendo un número no determinado de zonas.
 - b) Modelos de zonas cuasi-dimensionales: Son una evolución de los anteriores, a los que se añaden nuevos submodelos que permiten localizar la evolución de la posición de cada una de las zonas en el tiempo.

2. Clasificación según su objetivo:

- Modelos predictivos

Pueden adelantarse al proceso de combustión y predecir su desarrollo utilizando poca e incluso ninguna información experimental. En función de la dependencia de ciertos aspectos experimentales los modelos tienen mayor o menor capacidad predictiva.
- Modelos de diagnóstico

Utilizan el valor de la evolución experimental de alguna variable dependiente (normalmente la presión) para calcular la evolución del resto de variables.

El modelo implementado se sitúa dentro de los modelos de *diagnóstico* (tiene como dato de entrada la curva de presión de la combustión para obtener como uno de los parámetros fundamentales de salida la fracción de masa quemada FMQ) *cuasidimensional* (depende únicamente de la coordenada temporal, aunque es posible determinar la posición de cada una de las zonas en cada instante) *de dos zonas* (zona de quemados y zona de sin quemados).

Este tipo de modelos están caracterizados por:



- Rapidez de ejecución, pudiéndose realizar en tiempos razonables estudios paramétricos que permitan identificar los puntos de mejor funcionamiento.
- Alimentan submodelos que permiten obtener resultados de gran interés para el diseño y puesta a punto de motores.
- Permiten cuantificar los efectos que producen cambios en los parámetros de operación y diseño.
- Se adaptan con facilidad a diferentes geometrías de la cámara de combustión.

Las hipótesis aceptadas en el modelo son las siguientes:

1. La mezcla sin quemar está inicialmente en reposo. Una vez que se introducen los componentes de la mezcla en el interior de la bomba, se espera durante unos minutos antes de llevar a cabo el ensayo de combustión para favorecer la evaporación en el caso de combustibles líquidos (como en el presente trabajo), el mezclado de los componentes y asegurar la ausencia de movimiento en el seno de la mezcla que pudiera afectar a los resultados obtenidos en el experimento.
2. Modelo de dos zonas. Para la elaboración del modelo se han considerado dos zonas: una primera, que abarca todo el volumen de la bomba de combustión cuando aún no se ha iniciado la combustión, y otra segunda zona que llena la bomba una vez que ha concluido el proceso. Se les ha denominado *zona de sin quemados (sq)* y *zona de quemados (q)*. A medida que se produce la combustión, la zona de sin quemados va desapareciendo y transformándose en zona de quemados según transcurre el proceso. De esta manera, se supone que la combustión se inicia en el centro geométrico de la cámara de combustión a partir de un encendido provocado mediante el salto de una chispa en una bujía, y la zona de quemados se extiende de forma concéntrica sobre la de sin quemados con un frente de llama de forma esférica. El espesor de la zona de reacción es despreciable en comparación con las dimensiones totales de la cámara. De esta forma, el gas en el interior de la bomba consta de una fracción quemada X y una fracción sin quemar $1-X$ en equilibrio termodinámico local. Es por esto por lo que el modelo se considera de dos zonas.

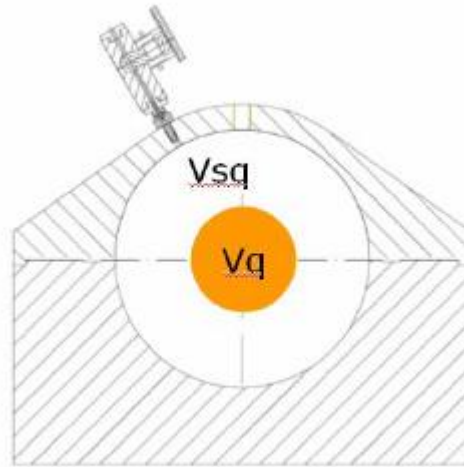


Figura 3.3. Esquema del modelo de dos zonas. [22]

3. La presión es uniforme e igual en ambas zonas y es sólo función del tiempo, consideración contemplada debido a que la velocidad de propagación de la onda de presión (la velocidad del sonido en el aire a 20°C es de 340m/s) va a ser muy superior a la velocidad de combustión del experimento.
4. La composición química se considera uniforme en cada una de las zonas en cada instante a lo largo del transcurso del experimento.
5. La temperatura calculada por el modelo en las dos zonas consideradas representará la media de las distribuciones de temperatura desarrolladas realmente en cada zona, pues el modelo calcula de manera general la temperatura global de la zona de sin quemados y quemados.
6. Se asume comportamiento de gas ideal.
7. El frente de reacción es liso y esférico. El frente de llama es una superficie de discontinuidad a través de la cual tiene lugar la transformación de los sin quemados a los productos quemados y que se va a suponer que se propaga en una dirección perpendicular a sí misma. No se tienen en cuenta fenómenos de turbulencia ni de celularidad en el frente de llama que pudieran no hacer esta hipótesis.
8. La masa y el volumen total del gas permanecen constantes durante la combustión.
9. En un primer momento no se va a considerar la transmisión de calor a las paredes de la bomba.
10. Se considera despreciable el espesor de la capa límite térmica adyacente a las paredes de la bomba comparándose con las dimensiones de la instalación.



11. Se desprecian los efectos de flotabilidad. El gas quemado en el momento del encendido provocado permanece en la misma localización durante todo el desplazamiento de la llama a través de toda la cámara de combustión.
12. No se contemplan cambios en el modelo si durante el desarrollo del experimento se ha producido autoencendido, considerándose éste como una combustión convencional, aun a sabiendas de que el comportamiento de este tipo de combustión probablemente no se efectúe a partir de la evolución de un frente de llama.
13. La composición de los gases sin quemar permanece congelada a lo largo de la combustión, mientras que la composición del gas quemado cambia en función de un modelo de equilibrio [22].

CAPÍTULO 4: MODIFICACIÓN BOMBA DE COMBUSTIÓN ESFÉRICA.

Una vez descrito en el capítulo anterior el estado de la instalación, se enumeran a continuación las modificaciones sobre ella con el fin de poder mejorar el acceso óptico existente para poder realizar un estudio de quimioluminiscencia emitida durante el proceso de combustión. Todas las modificaciones llevadas a cabo se han efectuado sobre la tapa de la bomba.

4.1 Diseño de los taladros a realizar.

Para empezar, lo primero en lo que se pensó fue en mejorar la forma de poder manipular el acceso óptico existente en caso de fallo o deterioro. Para ello, se busca la posibilidad de aumentar el diámetro de los dos taladros realizados en la anterior modificación, donde se sitúan los fotomultiplicadores que permiten medir la radiación quimioluminiscente de la combustión.

En primer lugar, se aborda la modificación del taladro horizontal. Como se puede observar en la siguiente imagen, el taladro existente en la instalación actual, posee un diámetro de 10.75 mm en su parte más externa, y a medida que se avanza hacia el interior de la bomba, se reduce el diámetro mediante dos nuevos taladros, el primero de 7.5 mm y el segundo de 5 mm. El eje del taladro está situado a 87.5 mm respecto del centro geométrico de la esfera.

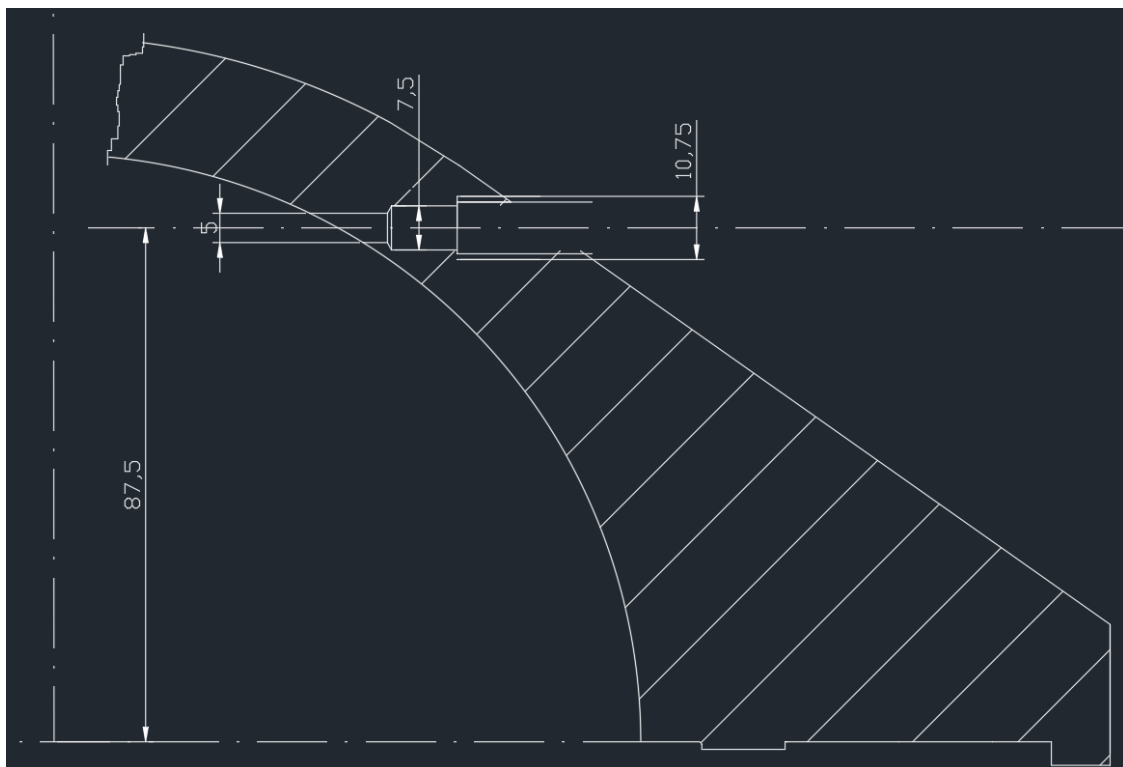


Figura 4.1. Dimensiones taladro horizontal instalación existente.

Puesto que el principal objetivo del proyecto, es mejorar el acceso óptico existente, se determina la opción de aumentar el diámetro de estos taladros con el fin de poder aumentar también, el diámetro del cristal del acceso óptico.

En función del tamaño de los cristales existentes en el mercado, y del cristal finalmente seleccionado, que se explicará posteriormente, se decide aumentar el diámetro del taladro hasta los 14 mm. Este taladro es pasante, realizando en él una rosca de paso fino, por lo que tenemos un primer taladro M14x1.25.

En segundo lugar, se pretende asegurar el asiento del tornillo con la pared de la tapa, realizando para ello un segundo taladro, de 28 mm de diámetro, en este caso ciego, con una profundidad de 35 mm desde el punto más exterior.

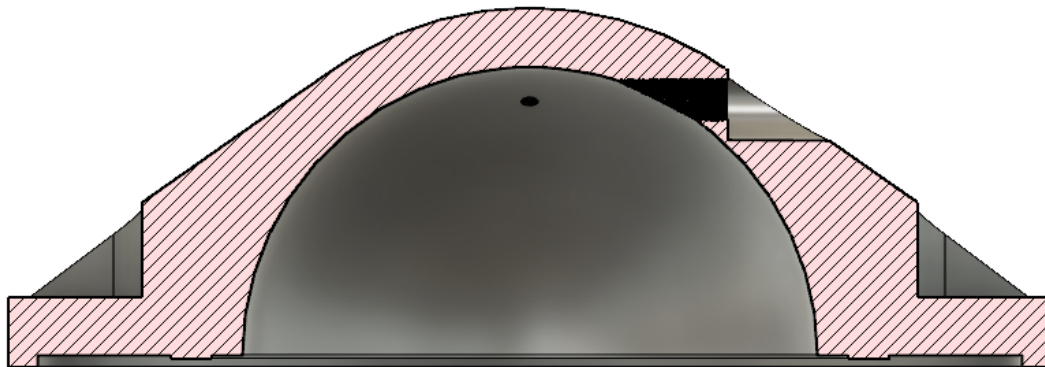


Figura 4.2. Modificación taladro horizontal.

Una vez diseñadas las dimensiones, el taladro horizontal podría presentar dos inconvenientes, el espesor de la pared en la zona más crítica de la tapa de la bomba debido al segundo taladro, y la distancia para el apoyo de la arandela y el tornillo con la tapa.

Como se muestra en la siguiente imagen, el espesor mínimo en la zona crítica anteriormente comentada es de 2 mm, con lo que, al producirse en un solo punto de toda tapa, y al irse aumentando considerablemente este espesor en puntos cercanos, la resistencia mecánica de la bomba queda garantizada.

En lo relativo a la distancia para el ajuste del tornillo y la tapa, es de 3.2 mm, por lo que también se garantiza el ajuste con la arandela.

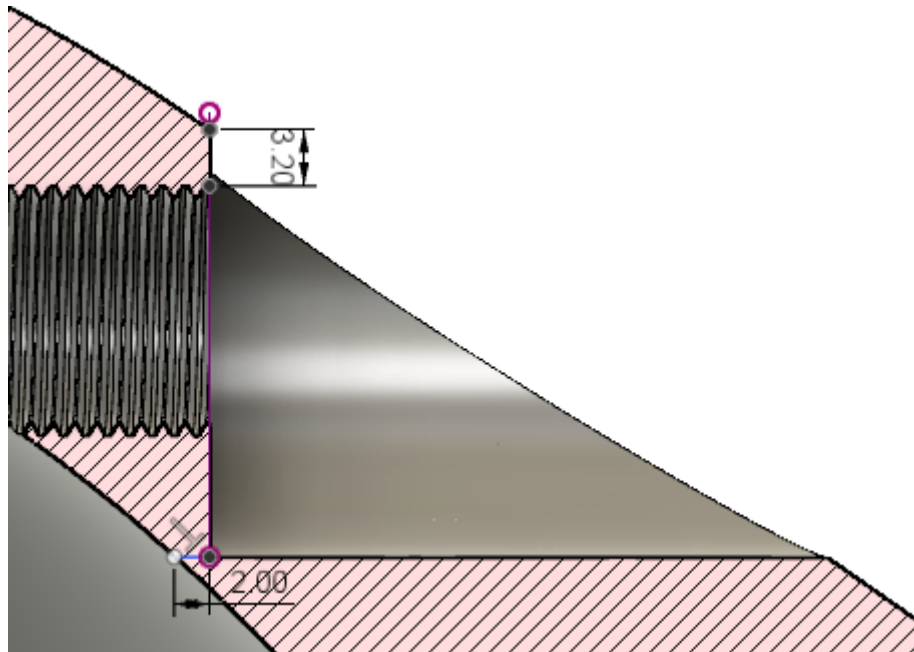


Figura 4.3. Detalles espesor taladro horizontal.

El taladro radial se aborda de la misma manera que el horizontal. La instalación existente como se puede ver en la figura posterior, posee un taladro de 7.5 mm, y el eje de este taladro está inclinado 60° respecto a la vertical.

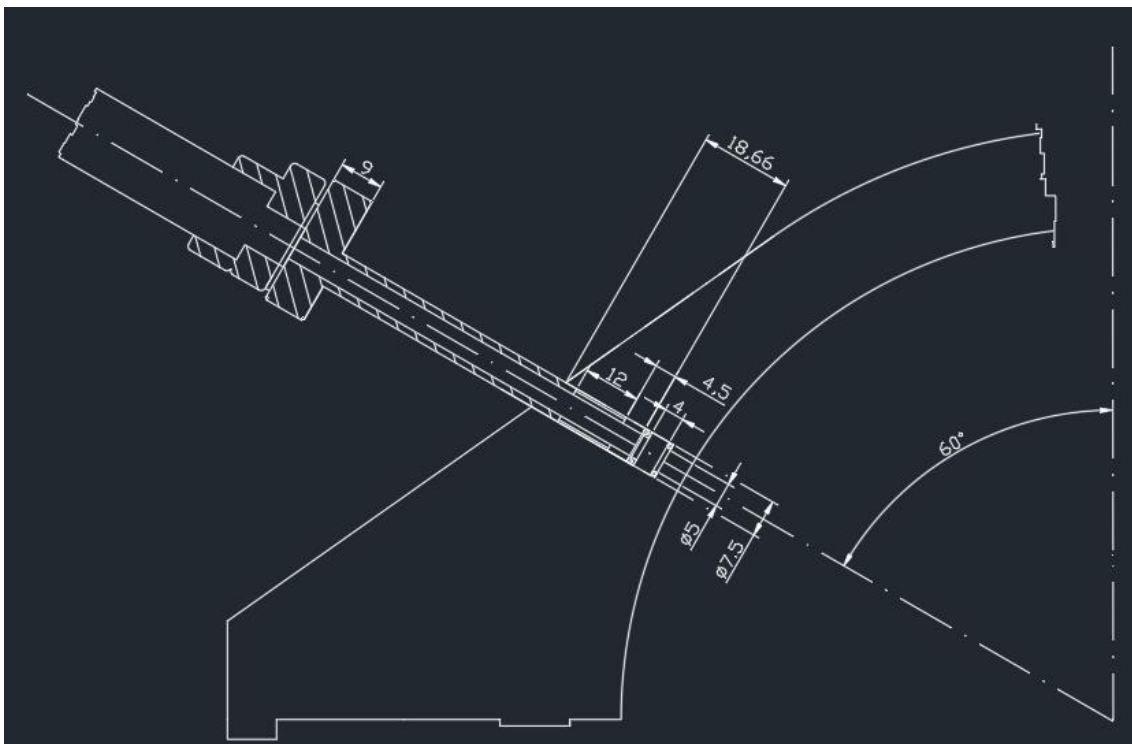


Figura 4.4. Dimensiones taladro radial instalación existente.

Puesto que se desea que los dos cristales tengan las mismas dimensiones, los taladros a realizar en este caso serán similares a los realizados en el taladro horizontal.

En primer lugar se realiza un taladro pasante de 14 mm de diámetro con rosca de paso fino (M14x1.25), y posteriormente se realiza otro taladro, en este caso ciego de 28 mm de diámetro y profundidad 13 mm, para el correcto ajuste de la cabeza del tornillo con la pared de la tapa.

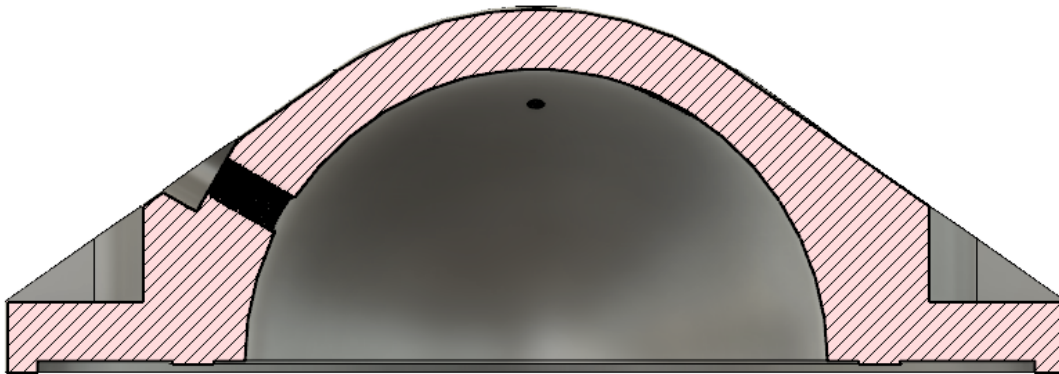


Figura 4.5. Modificación taladro radial.

Este taladro no presenta ninguno de los dos posibles problemas descritos para el taladro horizontal, por lo que el diseño de los dos tornillos se realiza de la misma manera. Un primer taladro pasante M14x1.25, y posteriormente un segundo taladro ciego de diámetro 28 mm.

Una vez diseñados los nuevos taladros para alojar los tornillos donde irán situados los fotomultiplicadores, se realiza con el programa Fusion360 una simulación de resistencia térmica para las condiciones más extremas que se pueden dar en la bomba, presiones máximas en la combustión de 150 bar y temperaturas máximas de 400 °C, garantizando de esta manera que la bomba no sufrirá deformaciones permanentes debido a las modificaciones realizadas.

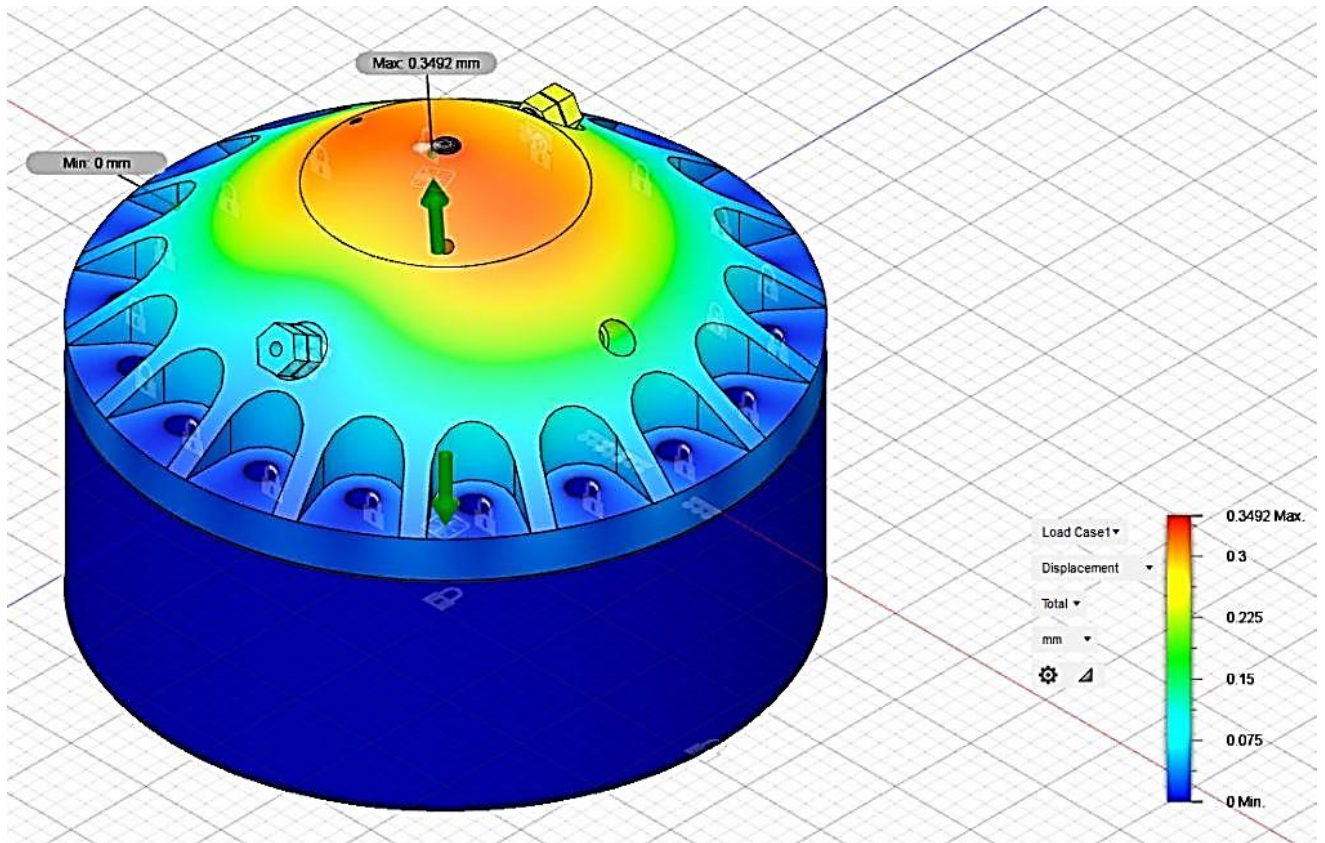


Figura 4.6. Simulación resistencia térmica.

4.2 Diseño de los tornillos.

Una vez realizadas las modificaciones en la tapa, se pasa al diseño de los tornillos. En este punto se plantea la opción de dos modelos de tornillos diferentes. Un primer tornillo que será el que se sitúe dentro de los nuevos taladros realizados, y que albergará en su interior tanto las juntas de estanqueidad seleccionadas como el cristal que permite el paso de la radiación, y un segundo tornillo que ira colocado sobre el primer tornillo para fijar los elementos anteriormente mencionados.

1. Diseño del primer tornillo:

Este primer tornillo de cabeza hexagonal, tiene un diámetro de 14 mm, y una longitud de 38 mm. Además, en él se realiza un taladro pasante de 7 mm de diámetro, y posteriormente un taladro ciego de 9 mm de diámetro, y 36 mm de profundidad desde la cabeza del tornillo. También se realizará una rosca métrica M9x1.25 en los 10 mm primeros desde la cabeza del tornillo para la posterior colocación del segundo tornillo.

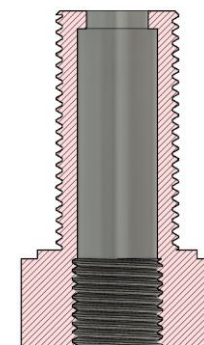


Figura 4.7. Diseño del primer tornillo.

2. Diseño del segundo tornillo:

El segundo tornillo, también de cabeza hexagonal, tiene un diámetro de 9 mm, pues irá situado dentro del primer tornillo. Este tornillo tiene una longitud de 21 mm, y se le realiza un taladro pasante de 7 mm. Sobre la cabeza de este segundo tornillo es donde se situarán los fotomultiplicadores que medirán la irradiación quimio-luminiscente emitida durante el proceso de combustión.

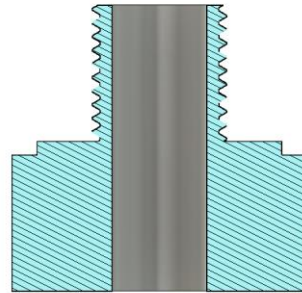


Figura 4.8. Diseño del segundo tornillo.

Una vez diseñados los dos tornillos, es necesario mencionar, la necesidad de un tubo de acero de 9 mm de diámetro exterior, y 1 mm de espesor (7 mm diámetro interior), y de una longitud de 20 mm, que irá situado dentro del primer tornillo y apretado por el segundo tornillo para mantener fijos tanto las juntas de vitón como el cristal.



Figura 4.9. Diseño del tubo de acero.

4.3 Selección de las juntas.

En este momento, se estudian diferentes materiales elastoméricos, con el objetivo de seleccionar aquella junta que mejores características presente y mejor se adapte a los requerimientos del sistema. El material elastomérico, cuando es sometido a presión, se comporta como un líquido de altísima viscosidad, transmitiendo en cada dirección la presión aplicada. De este modo, se asegura la función de estanqueidad, puesto que la junta tórica tiende a colmar con su propia masa, cualquier discontinuidad del sistema en el que es montada.

Cabe mencionar la definición por las normas DIN de “estanqueidad técnica” como:

- a) *Estanqueidad estática* cuando en un ambiente de líquidos, se asegura su “no pérdida” a través de la estanqueidad, o cuando en un ambiente gaseoso se manifiesta sólo una mínima difusión de gas.
- b) *Estanqueidad dinámica* cuando en ambiente de líquidos se forma un velo o film sutil del propio líquido sobre las superficies acopladas y en movimiento reciproco, originándose así una mínima pérdida.

La junta tórica presenta frente a otros sistemas de estanqueidad varias ventajas: estanqueidad simple y eficaz, dimensiones normalizadas, amplia selección de materiales, apta tanto para estanqueidad estática como dinámica, bajo costo debido a la producción en grandes series, etc.

Dentro de todos los posibles materiales elastoméricos en los que se fabrican las juntas tóricas, nos centramos en unos pocos para estudiar sus características y elegir la mejor opción. La siguiente tabla muestra un resumen de los diferentes polímeros: [24]

Nombre	Polímero	Características principales
Goma de nitrilo butadieno	NBR 70	<ul style="list-style-type: none">• Óptima resistencia mecánica al desgaste, aceites minerales y al calor.• Moderada resistencia a los carburantes y al envejecimiento atmosférico.
Nitrilo hidrogenado	HNBR 70	<ul style="list-style-type: none">• Óptimas características mecánicas, resistencia al desgaste.• Baja permeabilidad a los gases.
Vitón	FKM 75	<ul style="list-style-type: none">• Óptima resistencia química.• Alta resistencia a la temperatura.• Recomendado para contacto con carburantes.

Tabla 3.1. Características materiales elastoméricos [24]

Una vez analizadas las características de los elastómeros, se deciden utilizar juntas de vitón debido a su gran resistencia a elevadas temperaturas, y por su especial recomendación en aplicaciones con contacto directo con combustibles.

Las dimensiones de la junta tórica a emplear son: Diámetro exterior 9 mm, diámetro interior de 7 mm y espesor, por tanto, de 1 mm.

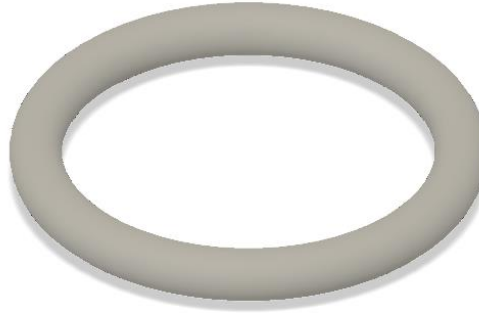


Figura 4.10. Junta de vitón.

4.4 Selección del cristal.

Uno de los objetivos al diseñar los nuevos taladros a mecanizar en la tapa, era poder ampliar la dimensión del cristal utilizado. Una vez llevada a cabo la modificación, y teniendo en cuenta que en el interior del tornillo debe acoger dos arandelas de vitón, el propio cristal, el tubo cilíndrico y el segundo tornillo para que todo el conjunto quede perfectamente fijado, el proveedor nos suministra un cristal con las siguientes dimensiones:

Cristal cilíndrico de cuarzo de 9 mm de diámetro y 4 mm de espesor.

Hay que tener en cuenta las características del cuarzo y el alto coste del material óptico, la elección correcta del cristal a utilizar es un aspecto crítico.

Las propiedades del cristal de cuarzo fundido SiO_2 son las siguientes: [25]

- Propiedades físicas
 - Absorción de agua-saturación = 0%
 - Densidad = $2.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$
 - Gama de transmisión óptica útil = 180-2500 nm
 - Índice refractivo = 1.46
 - Porosidad aparente = 0%



- Propiedades mecánicas
 - Módulo de tracción = 72-74 GPa
 - Resistencia a la cizalla = 1100 MPa
 - Resistencia a la tracción = 48 MPa

- Propiedades térmicas
 - Calor específico a 25°C = 670-740 J·K⁻¹·Kg⁻¹
 - Punto de fusión = 1715 °C
 - Temperatura máxima de utilización continua = 1100-1400°C

- Resistencia química
 - Ácidos-concentraciones = Buena
 - Ácidos-diluidos = Buena
 - Alcalís = Buena
 - Halógenos = Buena
 - Metales = Aceptable

Tanto las propiedades físicas, térmicas como químicas indican que el cuarzo es un material apto para la aplicación bajo las condiciones de la cual se va a utilizar, destacando de entre sus propiedades principalmente la temperatura máxima de utilización continua, pues es muy superior a la que va a estar sometido.

La siguiente imagen muestra el montaje final de los dos tornillos, con las juntas de vitón y el cristal de cuarzo.

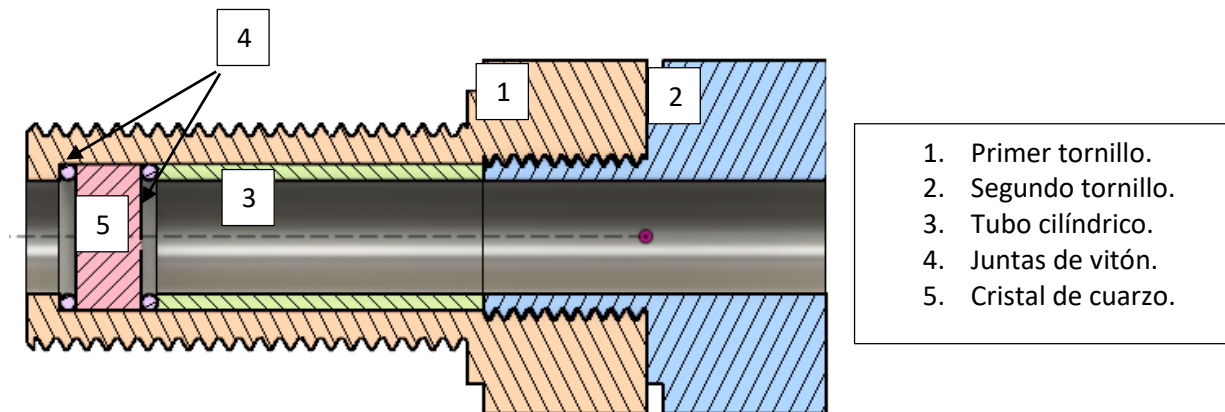


Figura 4.11. Montaje conjunto tornillos, juntas y cristal.

En el Anexo 1: Planos, se muestran los planos completos tanto del diseño de los dos tornillos, como la sección del taladro horizontal y del taladro a 30° respecto de la horizontal. En los planos se muestra, además de las vistas principales y las secciones de detalle, una imagen en 3 dimensiones del diseño de la pieza para facilitar la comprensión.

Las características principales de los dos tornillos como de los dos taladros son las siguientes:

- Tornillo 1:
 - Cabeza hexagonal de 12.5 mm de lado.
 - Espesor cabeza: 10 mm
 - Longitud total del tornillo: 38 mm
 - Rosca: M14x1.25.
 - Taladro interno 1: Taladro ciego de 9 mm de diámetro y 36 mm de profundidad desde la cabeza, con rosca M10x1 para una profundidad de 10 mm desde la cabeza.
 - Taladro interno 2: Taladro pasante de 7 mm de diámetro, para el perfecto asiento de las juntas de vitón y el cristal de cuarzo en el interior del tornillo.

- Tornillo 2:
 - Cabeza hexagonal de 12.5 mm de lado.
 - Espesor cabeza: 10 mm
 - Longitud total del tornillo: 21 mm
 - Rosca: M10x1.
 - Taladro interno: Taladro pasante de 7 mm de diámetro para el perfecto asiento del tubo cilíndrico con la junta de vitón situados en el interior del primer tornillo.



- Taladro Horizontal:
 - Posición: Eje del taladro situado a 87.5 mm respecto del centro de la esfera.
 - Taladro pasante con rosca M14x1.25.
 - Taladro ciego de 28 mm de diámetro con una profundidad de 34.95 mm.

- Taladro a 30°:
 - Posición: Eje del taladro con una inclinación de 30° respecto de la horizontal.
 - Taladro pasante con rosca M14x1.25.
 - Taladro ciego de 28 mm de diámetro con una profundidad de 13.16 mm.



Universidad de Valladolid

DISEÑO DE UN ACCESO ÓPTICO EN UNA BOMBA DE
COMBUSTIÓN A VOLUMEN CONSTANTE Y
CARACTERIZACIÓN DE METANOL



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

CAPÍTULO 5: RESULTADOS EXPERIMENTALES.

5.1 Comparación y validación de los resultados.

La velocidad de combustión laminar se define como la velocidad con la que la mezcla fresca se convierte en quemados en el frente de llama. Mediante el análisis de la velocidad de combustión laminar de un combustible, se pueden proporcionar importantes características al respecto. La velocidad de combustión adiabática de mezclas metanol-aire, ha sido investigada por varios autores como se ha expuesto en el Capítulo 2 del presente trabajo.

Los experimentos se realizan en una bomba de combustión esférica de volumen constante, similar a la utilizada en los experimentos realizados por *Metghalchi & Keck (1982)* [11] y por *Saeed & Stone (2004)* [14].

Este estudio se ha realizado mediante un barrido de dosado ($0.7 < Fr < 1.2$) para la determinación de la velocidad de combustión laminar:

La forma de proceder para llevar a cabo el experimento ha sido la siguiente:

- En primer lugar, se definen las condiciones de presión y temperatura a las que se va a realizar el experimento, en el caso del presente estudio ($p = 1$ bar y $T = 300$ K).
- Determinación de la cantidad de metanol a introducir en función de la relación metanol-aire. El método utilizado es el de las presiones parciales, por lo que se introduce la cantidad de metanol necesaria en la bomba para conseguir la presión parcial necesaria, y posteriormente se introduce aire desde la línea hasta llegar a 1 bar.
- Una vez introducida la mezcla en la cámara, se esperan 5 minutos para que se asiente toda la mezcla.
- Se realiza la combustión de la mezcla haciendo saltar la chispa. Una vez que se inicia la combustión, un frente de llama esférico se propaga dentro de la cámara, comprimiendo y quemando la mezcla.
- Durante el desarrollo del proceso de combustión, la evolución de la presión se registra mediante un transductor piezoeléctrico Kistler [26]. De esta manera, se obtienen la gráfica de la presión frente al tiempo y los datos en el osciloscopio, y se vuelcan al ordenador para introducirlos en el modelo de diagnóstico.
- Una vez pasados los resultados obtenidos por el modelo de diagnóstico, se obtienen la gráfica de la velocidad de combustión laminar frente a temperatura, que se ajustara mediante una ecuación del tipo:

$$S_u = S_{u0} * \left(\frac{T}{T_{u0}}\right)^\alpha \quad (5.1)$$

- Una vez obtenidos los valores para la velocidad de combustión laminar, se comparan con los datos recogidos en la revisión bibliográfica para la validación de nuestros resultados.

Las curvas de presión registradas en el osciloscopio, una vez realizados los experimentos, se introducen en el modelo de diagnóstico del proceso de combustión de dos zonas, para determinar parámetros de interés durante el proceso de combustión, como la evolución temporal de la presión en condiciones ambientales para diferentes dosados, la evolución de la temperatura frente a la presión, la variación temporal de la temperatura de los sin quemados en función del dosado, o la velocidad de combustión laminar.

Las siguientes figuras muestran la evolución de los parámetros anteriormente mencionados:

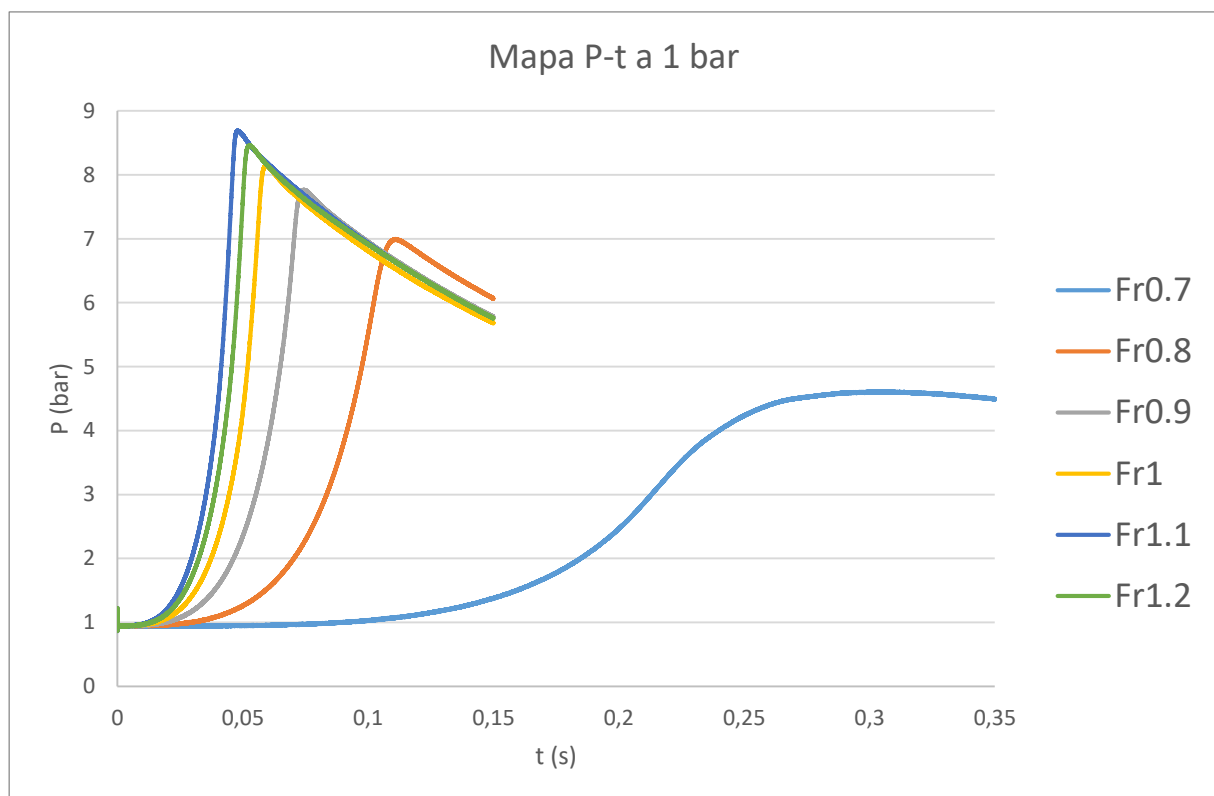


Figura 5.1. Evolución temporal de la presión para combustiones de metanol en condiciones ambientales y para diferentes dosados

La figura anterior muestra la evolución temporal de la presión en combustiones de metanol, para una presión inicial de 1 bar, y un barrido de dosado 0.7-1.2. El tiempo cero se corresponde al encendido de la chispa, y, a medida que se produce la combustión, la presión va aumentando, con el frente esférico de llama creciendo desde el centro de la bomba, hasta alcanzarse el máximo cuando toda la mezcla se quema, y el frente de llama alcanza la pared de la bomba. Posteriormente, la presión disminuye debido a la transferencia de calor a la pared de la bomba. El aumento de la presión está relacionado con la fracción de masa quemada, y también, con la velocidad de combustión laminar, como se verá posteriormente. Como se puede observar en la

gráfica, el tiempo en el que se alcanza el máximo de presión va disminuyendo a medida que se aumenta la relación metanol-aire desde 0.7 a 1.1. En esta relación de dosado se produce el máximo de la presión en el menor tiempo posible, por lo que como se verá más adelante, es la que tiene una velocidad de combustión laminar más elevada. Para el siguiente dosado ($Fr=1.2$), el máximo de la presión es más bajo que en el caso anterior, y la combustión también es más lenta.

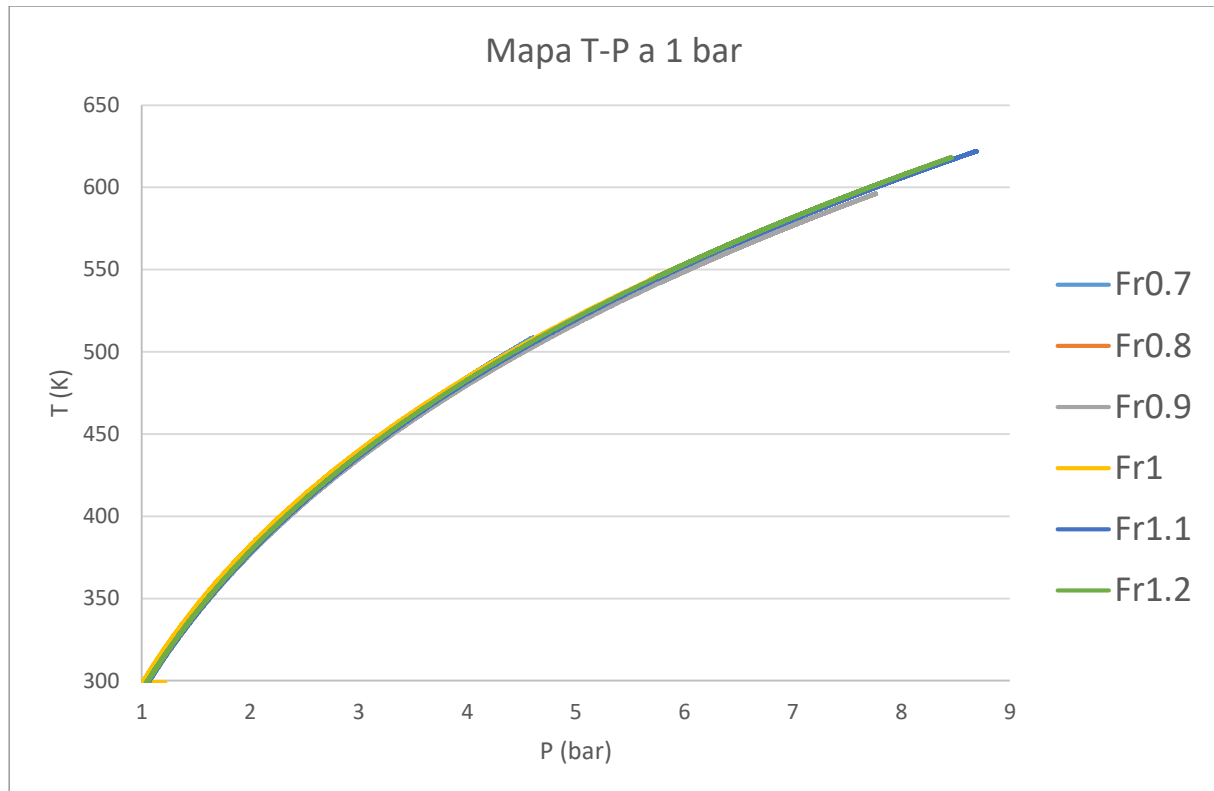


Figura 5.2. Evolución de la temperatura frente a la presión para diferentes dosados.

En la figura 17 se puede ver la evolución de la temperatura frente a la presión para los diferentes dosados. En condiciones atmosféricas (1 bar – 300 K), las curvas para los diferentes dosados, tienen un comportamiento similar, a excepción del máximo alcanzando tanto en presión como en temperatura durante el proceso de combustión. Como ya se ha mencionado antes, el máximo de presión y temperatura va aumentando con el aumento de dosado, hasta que el máximo absoluto se produce para un dosado de $Fr=1.1$.

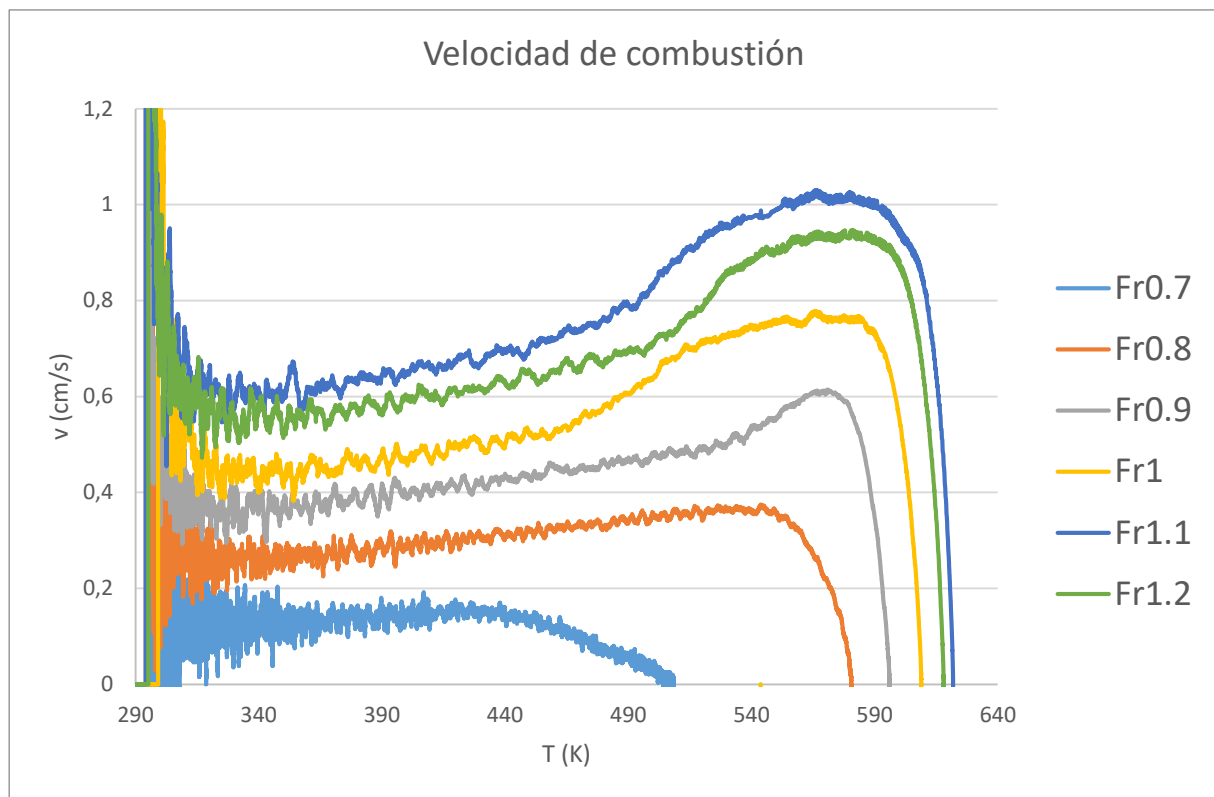


Figura 5.3. Evolución de las velocidades de combustión laminar frente a la temperatura para el barrido de dosado.

La figura anterior muestra la evolución de la velocidad de combustión laminar frente a la temperatura, de las combustiones realizadas en condiciones ambientales para los diferentes dosados.

Como ya se mencionó anteriormente en la evolución temporal de la presión, la velocidad de combustión está ligada con el momento en el que se produce el máximo de la presión, siendo la velocidad de combustión mayor, cuanto menor es el tiempo en el que se alcanza el máximo de presión. Por tanto, la velocidad de combustión laminar va aumentando desde el dosado $Fr=0.7$, que es la curva más lenta, hasta el máximo que se produce para un dosado $Fr=1.1$. Posteriormente para dosados más elevados, la velocidad de combustión será más baja, como también lo era el tiempo en el que se alcanzaba el máximo en las curvas de la evolución temporal de la presión.

Basándonos en las gráficas de la velocidad de la combustión laminar frente a la temperatura, para cada dosado, realizamos un ajuste no lineal para encontrar una correlación del tipo:

$$y = a * x^b \tag{5.2}$$

Las siguientes gráficas muestran dicha velocidad de combustión laminar para cada dosado, incluyendo en ellas la línea de ajuste obtenida en cada caso:

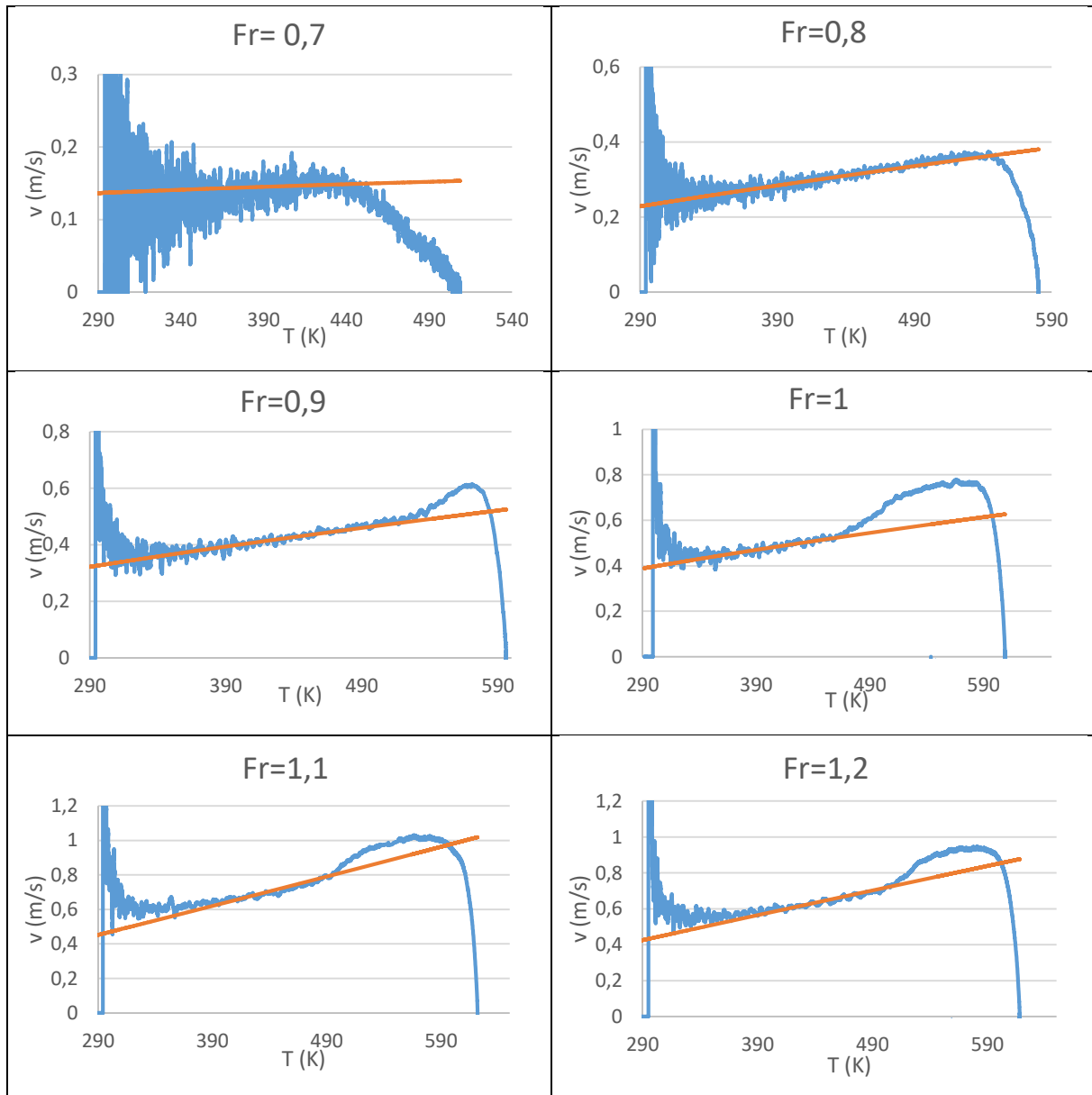


Figura 5.4. Velocidad de combustión laminar y curva de ajuste para el barrido de dosado.

La siguiente tabla muestra los coeficientes de la línea de ajuste:

$y = a * x^b$			
Fr	a	b	y
0,70	0,1375	0,2056	0,1369
0,80	0,2344	0,7335	0,2311
0,90	0,3296	0,6778	0,3252
1,00	0,3966	0,6455	0,3958
1,10	0,4691	1,064	0,4593
1,20	0,4394	0,9562	0,4326

Tabla 5.1. Valores de coeficientes de la línea de ajuste.



Una vez obtenida la línea de ajuste para cada relación metanol-aire, se puede obtener el valor de velocidad de combustión laminar para la temperatura inicial. Nuestros valores experimentales se comparan con los resultados obtenidos por otros autores, expuestos en el capítulo 2 de este estudio, para la validación de nuestros resultados.

Gibs and Calcote-1959		Gulder-1982		Metghalchi and Keck-1982		Muller-1997		Davis and Law-1998	
<i>LBV</i>	<i>Fr</i>	<i>LBV</i>	<i>Fr</i>	<i>LBV</i>	<i>Fr</i>	<i>LBV</i>	<i>Fr</i>	<i>LBV</i>	<i>Fr</i>
0,31	0,70	0,22	0,70	0,13	0,70	0,16	0,70		0,70
0,40	0,80	0,32	0,80	0,23	0,80	0,24	0,80	0,34	0,80
0,45	0,90	0,41	0,90	0,30	0,90	0,32	0,90	0,40	0,90
0,48	1,00	0,44	1,00	0,35	1,00	0,39	1,00	0,43	1,00
0,46	1,10	0,48	1,10	0,37	1,10		1,10	0,46	1,10
0,42	1,20	0,46	1,20	0,36	1,20		1,20	0,45	1,20
0,41	1,30	0,40	1,30	0,32	1,30		1,30	0,43	1,30
Saeed and Stone-2004		Liao et al-2006		Vancoille et al.-2012		Siligham et al.-2014		Presente trabajo	
<i>LBV</i>	<i>Fr</i>	<i>LBV</i>	<i>Fr</i>	<i>LBV</i>	<i>Fr</i>	<i>LBV</i>	<i>Fr</i>	<i>LBV</i>	<i>Fr</i>
0,18	0,70	0,21	0,70	0,21	0,70	0,18	0,70	0,14	0,70
0,27	0,80	0,30	0,80	0,29	0,80	0,27	0,80	0,24	0,80
0,38	0,90	0,37	0,90	0,37	0,90	0,35	0,90	0,33	0,90
0,46	1,00	0,42	1,00	0,43	1,00	0,41	1,00	0,40	1,00
0,49	1,10	0,43	1,10	0,46	1,10	0,45	1,10	0,47	1,10
0,48	1,20	0,40	1,20	0,45	1,20	0,45	1,20	0,44	1,20
0,43	1,30	0,35	1,30	0,43	1,30	0,43	1,30		

Tabla 5.2. Valores velocidad combustión laminar en diferentes autores.

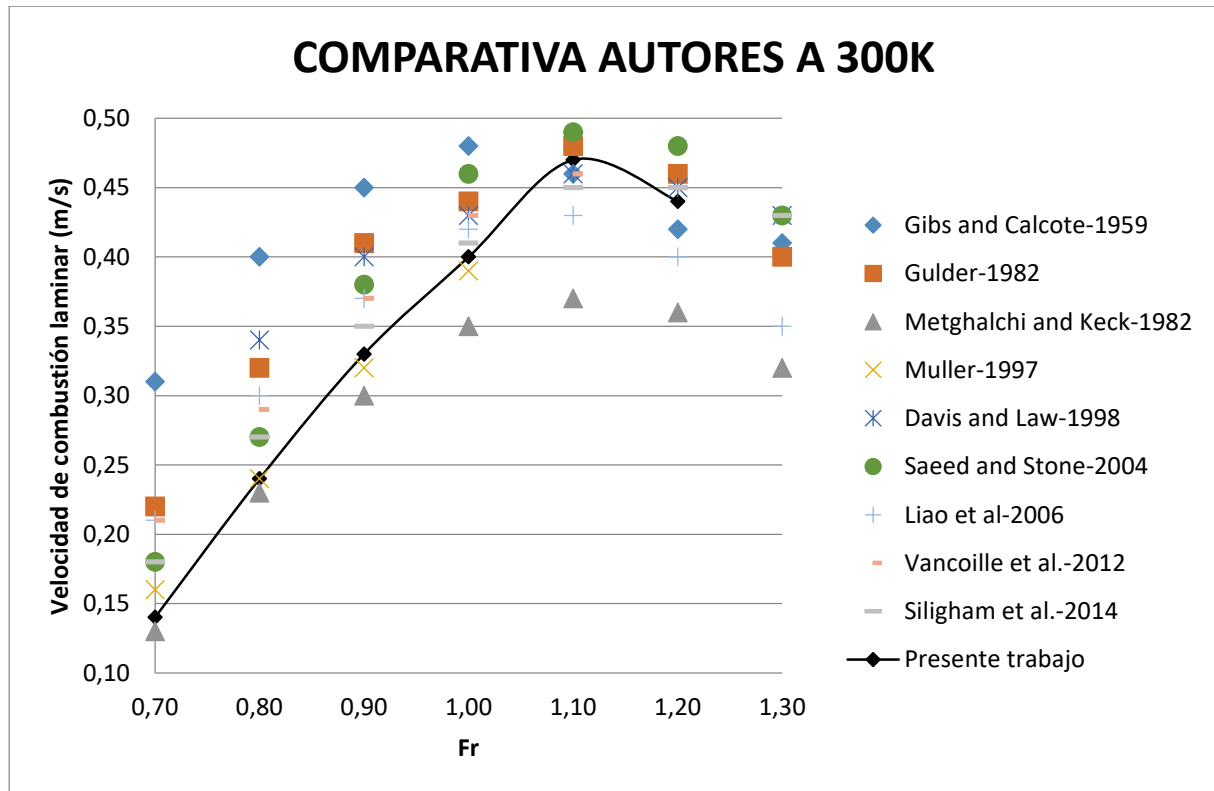


Figura 5.5. Comparativa de velocidades de combustión laminar de metanol obtenidas por diferentes autores.

Como se puede observar en la Figura 20, los valores experimentales obtenidos en el presente TFM se encuentran dentro del rango de valores obtenidos por otros autores en sus experimentos.

Si nos centramos en los experimentos en los que los autores, además de realizarlos en las mismas condiciones de presión y temperatura, han utilizado una bomba esférica a volumen constante similar a la utilizada para realizar estos experimentos, como *Metghalchi & Keck* y *Saeed & Stone*, vemos que, para mezclas pobres, nuestros valores de velocidad de combustión laminar son muy próximos a los obtenidos por *Metghalchi & Keck*, mientras que, para mezclas más ricas, los resultados obtenidos distan más, y son más próximos a los resultados expuestos por *Saeed & Stone*.

Estas diferencias con los resultados obtenidos por los autores mencionados, se pueden deber tanto a la utilización de diferentes modelos termodinámicos de diagnóstico, como a la diferente composición de la mezcla a quemar y al rango de datos válido utilizado por cada autor, para determinar estos valores. Para la realización de este trabajo se ha utilizado un modelo de diagnóstico de dos zonas, mientras que en los experimentos realizados por *Saeed & Stone*, se utilizó un novedoso modelo multizona (modelo de 10 zonas con 200 pasos).

Por otra parte, la composición de la mezcla introducida en la cámara de combustión en nuestros ensayos, ha sido únicamente mezclas metanol-aire, mientras que *Metghalchi & Keck* utilizaron un diluyente de composición 85% N₂ y 15% CO₂ para simular los productos de combustión.

Es por esto por lo que sus valores obtenidos para la velocidad de combustión laminar son ligeramente inferiores.

5.2 Estudio paramétrico de la velocidad de combustión laminar del metanol en función de la presión, temperatura y dosado.

Una vez validados los resultados experimentales obtenidos, se pasa a realizar un estudio paramétrico de la velocidad de combustión laminar. La siguiente tabla resumen muestra las condiciones en los ensayos realizados:

	P (bar)	T (°C)	T (K)
Fr = 1	1	26	299
	1	77	350
	2	83	356
	4	82	355
Fr = 0,9	1	21	294
	1	82,5	355,5
	2	88	361
Fr = 0,8	1	21	294
	1	81	354
	2	85	358

Tabla 5.3. Condiciones de P y T en los experimentos realizados.

El objetivo de este estudio es encontrar una correlación similar a la de *Metghalchi & Keck*, que correlacione la velocidad de combustión laminar con un amplio rango de presión y temperatura.

A) Influencia de la temperatura.

En primer lugar, se realizará un estudio manteniendo constante la presión (1 bar) y el dosado, y se realizan combustiones a diferentes temperaturas.

- **Dosado Fr = 1**

Las Figuras 21 y 22 muestran la evolución de la presión frente a la temperatura y la evolución temporal de la presión, respectivamente.

En ellas se puede observar que para el caso en el que el ensayo se produce en condiciones ambientales, la presión máxima alcanzada durante la combustión es ligeramente superior a la

alcanzada al realizar el ensayo en condiciones de temperatura mayor. En cambio, al aumentar la temperatura, el máximo de la presión en la evolución temporal se alcanza antes, lo que significa que la velocidad de combustión es mayor.

Por tanto, en condiciones de presiones constante, la velocidad de combustión laminar es mayor cuanto mayor es la temperatura a la que se realiza la combustión.

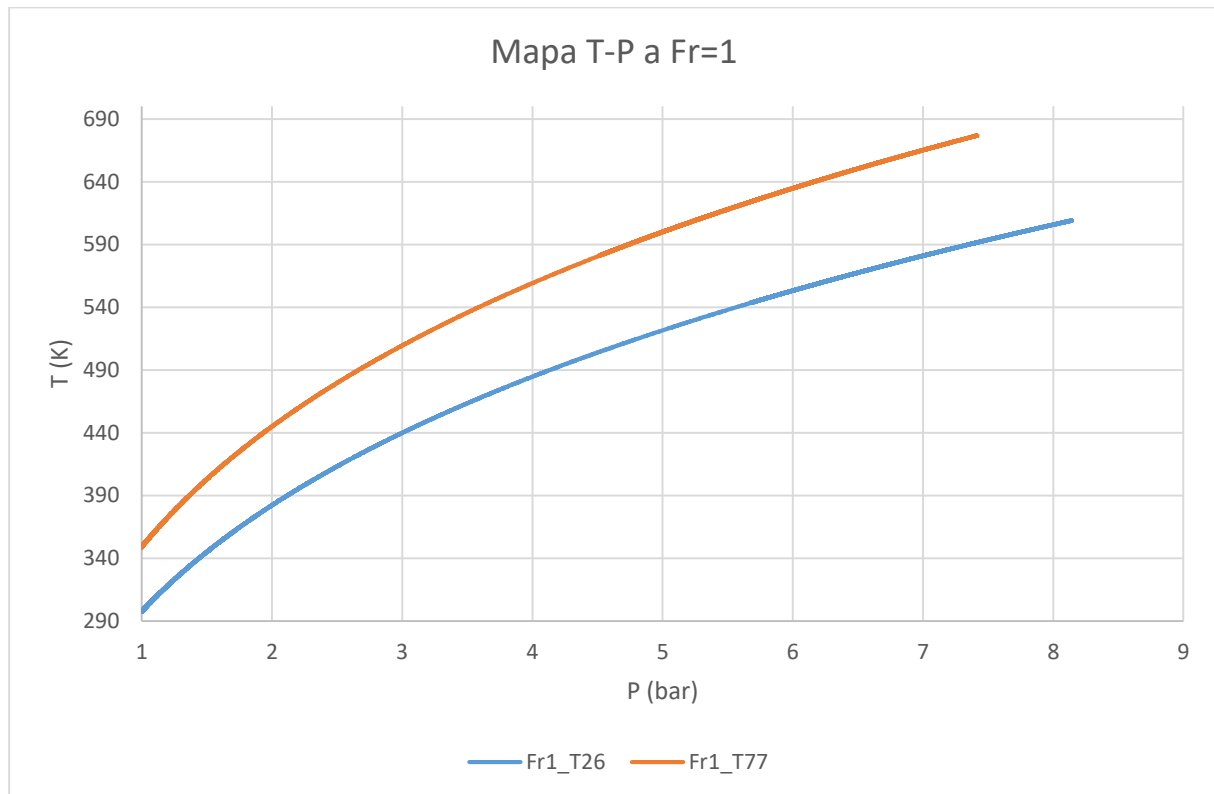


Figura 5.6. Mapa T-P a dosado 1 para observar la influencia de la temperatura con presiones constantes.

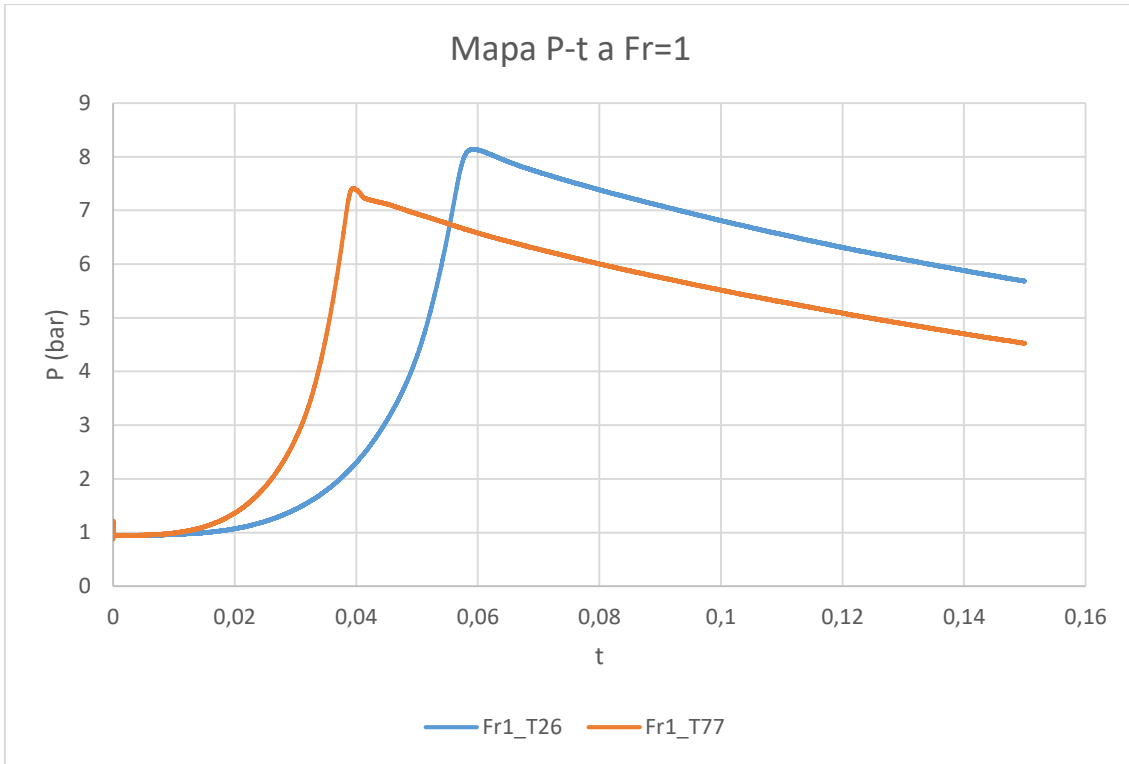


Figura 5.7. Mapa P-t a dosado 1 para observar la influencia de la temperatura con presiones constantes.

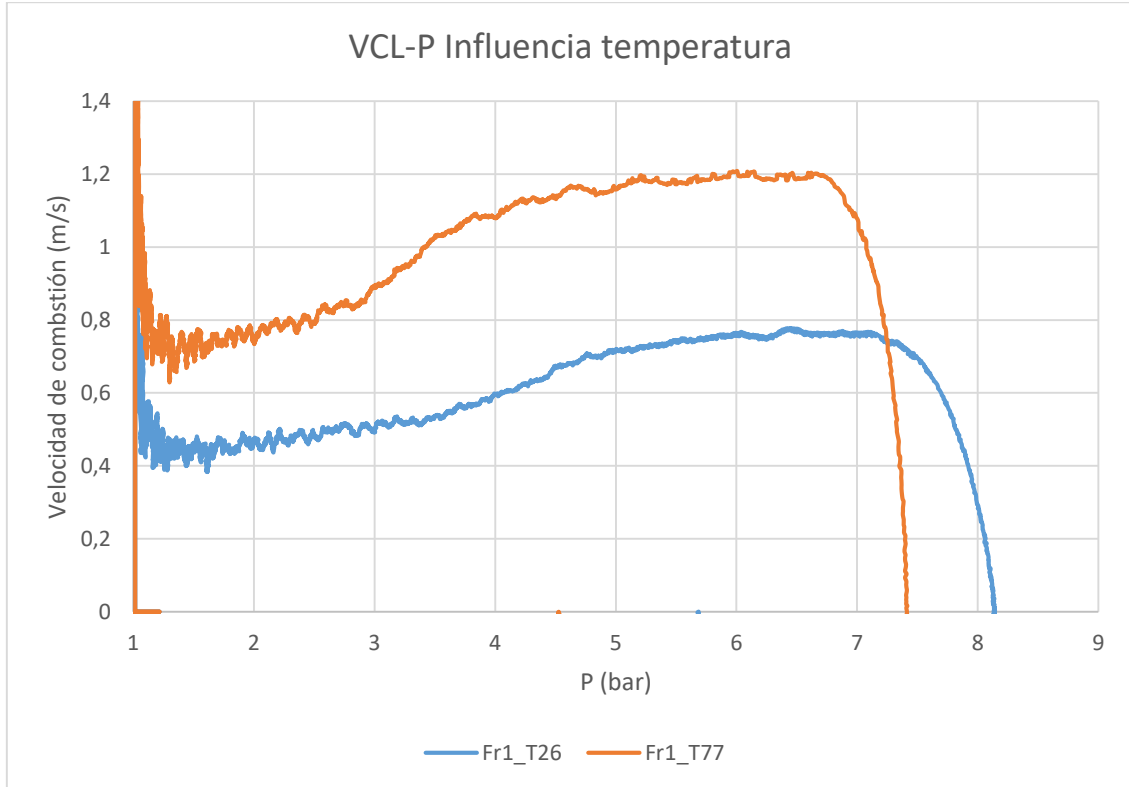


Figura 5.8. Influencia de la temperatura para dosado 1 en la velocidad de combustión a presión constante.

- **Dosado $Fr = 0.9$**

De manera análoga a lo realizado con dosado estequiométrico, se mantiene constante la presión de 1 bar durante los ensayos, y se modifica la temperatura para observar su influencia en las curvas.

Las siguientes gráficas muestran la evolución de la presión en primer lugar frente a la temperatura, y en segundo lugar frente al tiempo:

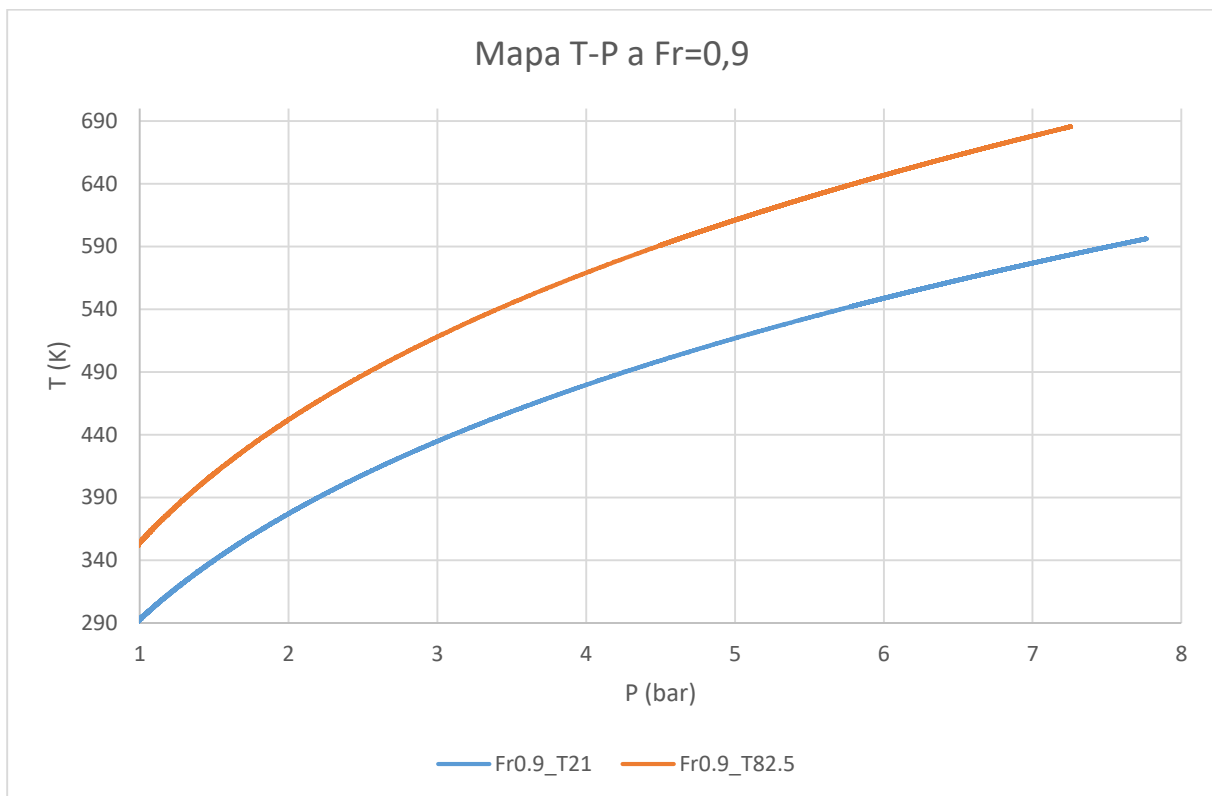


Figura 5.9. Mapa T-P a dosado 0.9 para observar la influencia de la temperatura con presiones constantes.

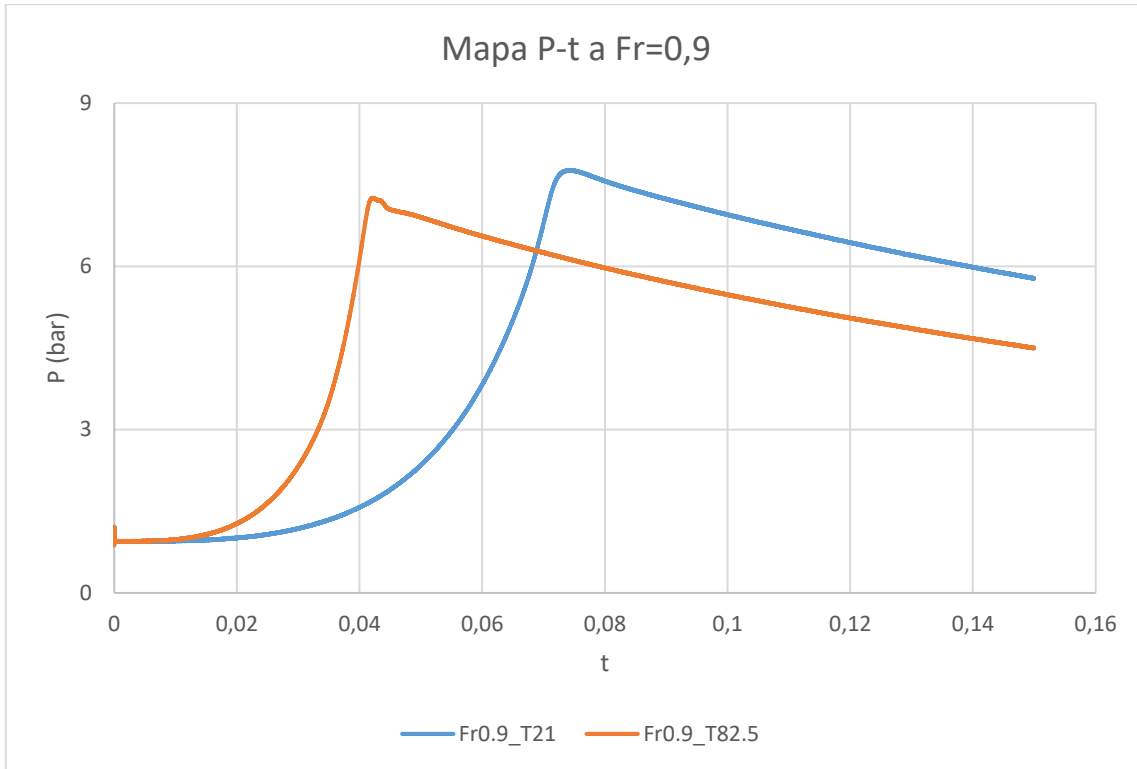


Figura 5.10. Mapa P-t a dosado 0.9 para observar la influencia de la temperatura con presiones constantes.

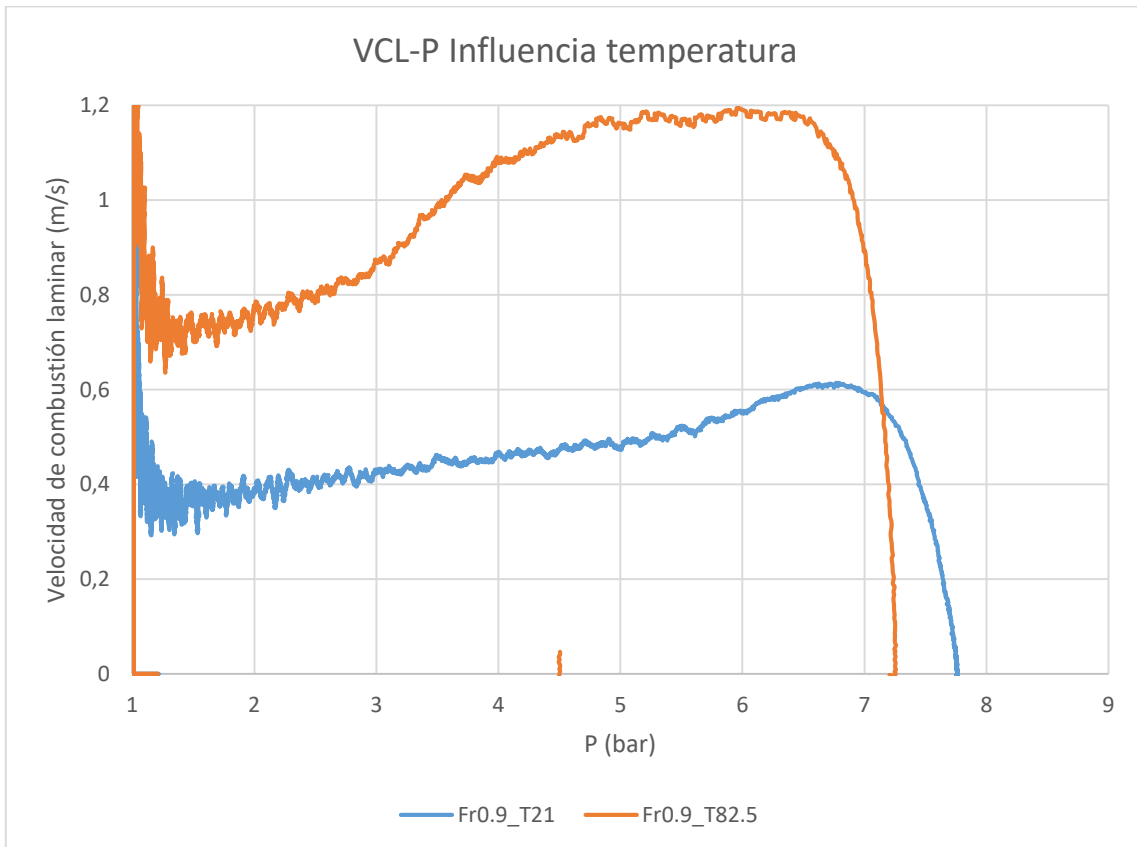


Figura 5.11. Influencia de la temperatura para dosado 0.9 en la velocidad de combustión laminar a presión constante.

Al igual que para dosado estequiométrico, en condiciones de presión constante, la combustión es más rápida cuanto mayor es la temperatura, por tanto, la velocidad de combustión laminar será mayor en combustiones con temperatura superior a la temperatura ambiental.

De la misma forma que en el caso anterior, la presión máxima alcanzada durante la combustión, es mayor en el caso de la combustión realizada a temperatura ambiente que la realizada al aumentar la temperatura, precisamente por el hecho de que no necesita llegar a tanta presión para producirse la combustión.

Como se verá a continuación para el dosado de 0.8, esta es la tónica general que siguen los experimentos, y, por tanto, se puede afirmar que cuanto mayor es la temperatura de ensayo, mayor será la velocidad de combustión laminar.

- **Dosado Fr = 0.8**

Las siguientes figuras muestran la evolución de la presión en primer lugar frente a la temperatura, y en segundo lugar frente al tiempo:

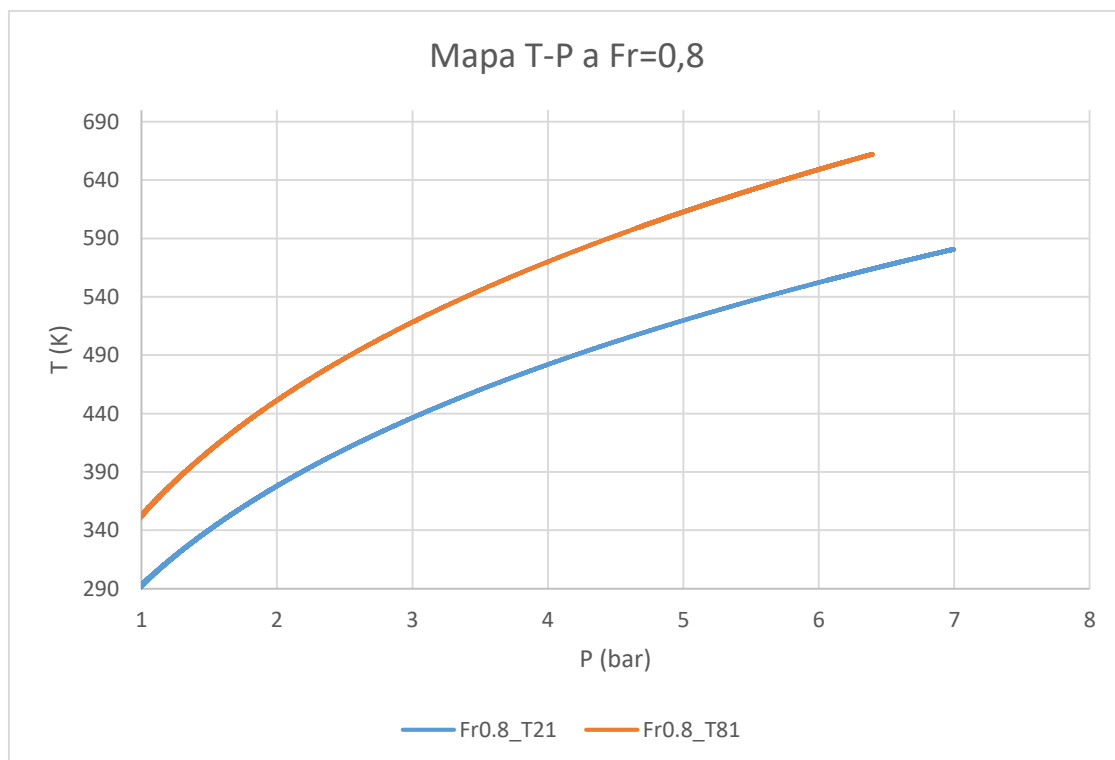


Figura 5.12. Mapa T-P a dosado 0.8 para observar la influencia de la temperatura a presiones constantes.

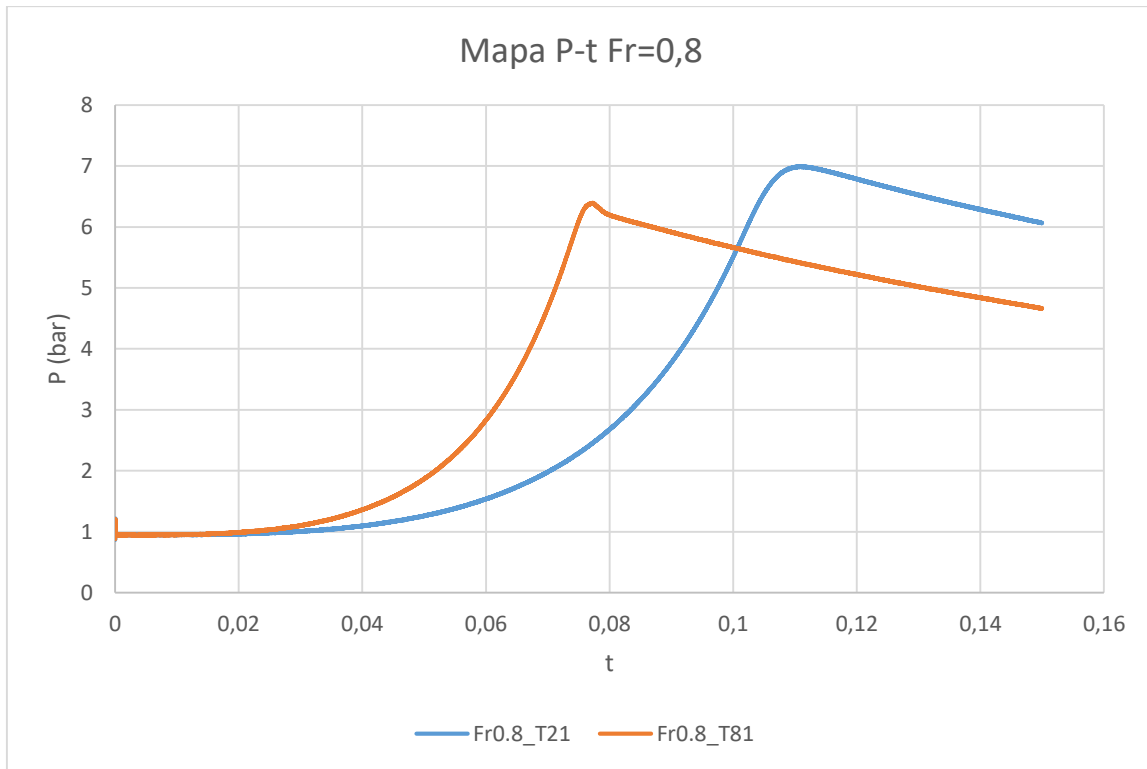


Figura 5.13. Mapa P-t a dosado 0.8 para observar la influencia de la temperatura a presiones constantes.

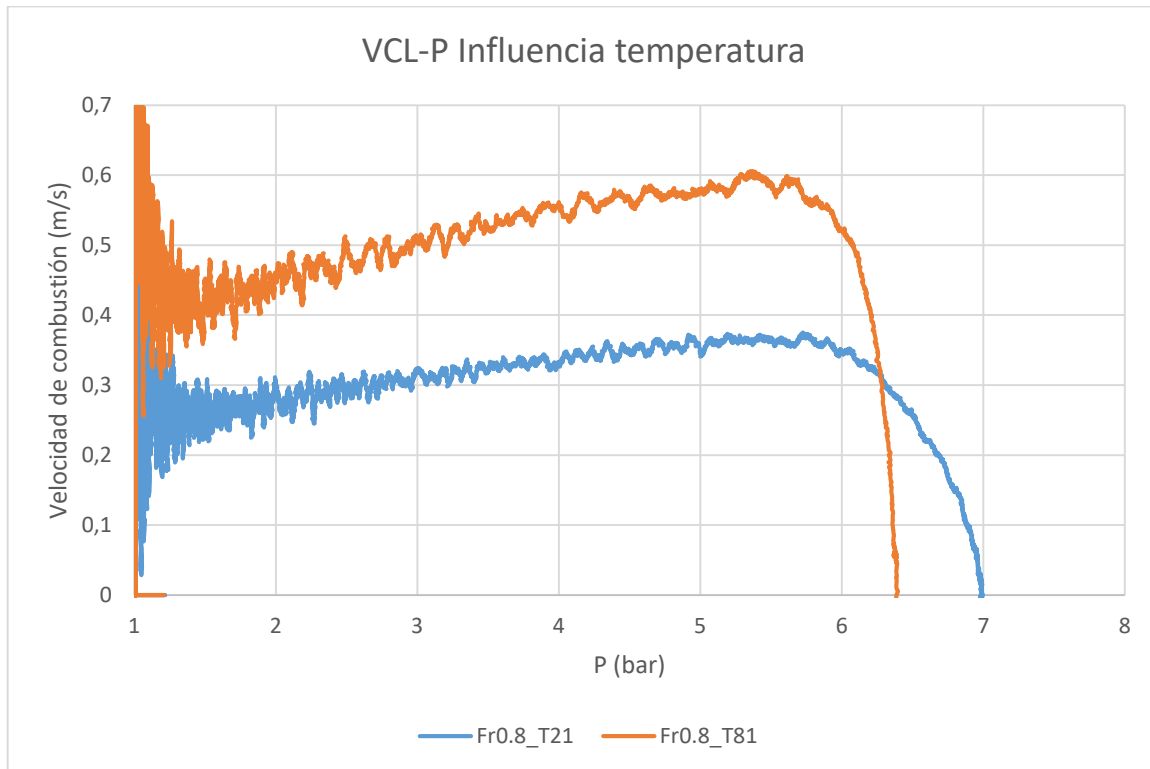


Figura 5.14. Influencia de la temperatura para dosado 0.8 en la velocidad de combustión laminar a presión constante.

A medida que aumenta la temperatura, la tendencia es la misma para todos los dosados considerados.

B) Influencia de la presión.

Una vez estudiada la influencia de la temperatura, manteniendo constante la presión, se va a pasar a analizar la influencia de la presión manteniendo constante la temperatura. Para ello, se van a realizar para los diferentes dosados (0.9 y 1), combustiones variando las condiciones iniciales de presión (a 1bar, 2 bar y para el caso de dosado estequimétrico 4 bar), manteniendo constante la temperatura, en torno a los 355 K.

Las siguientes figuras muestran los resultados obtenidos para los diferentes dosados:

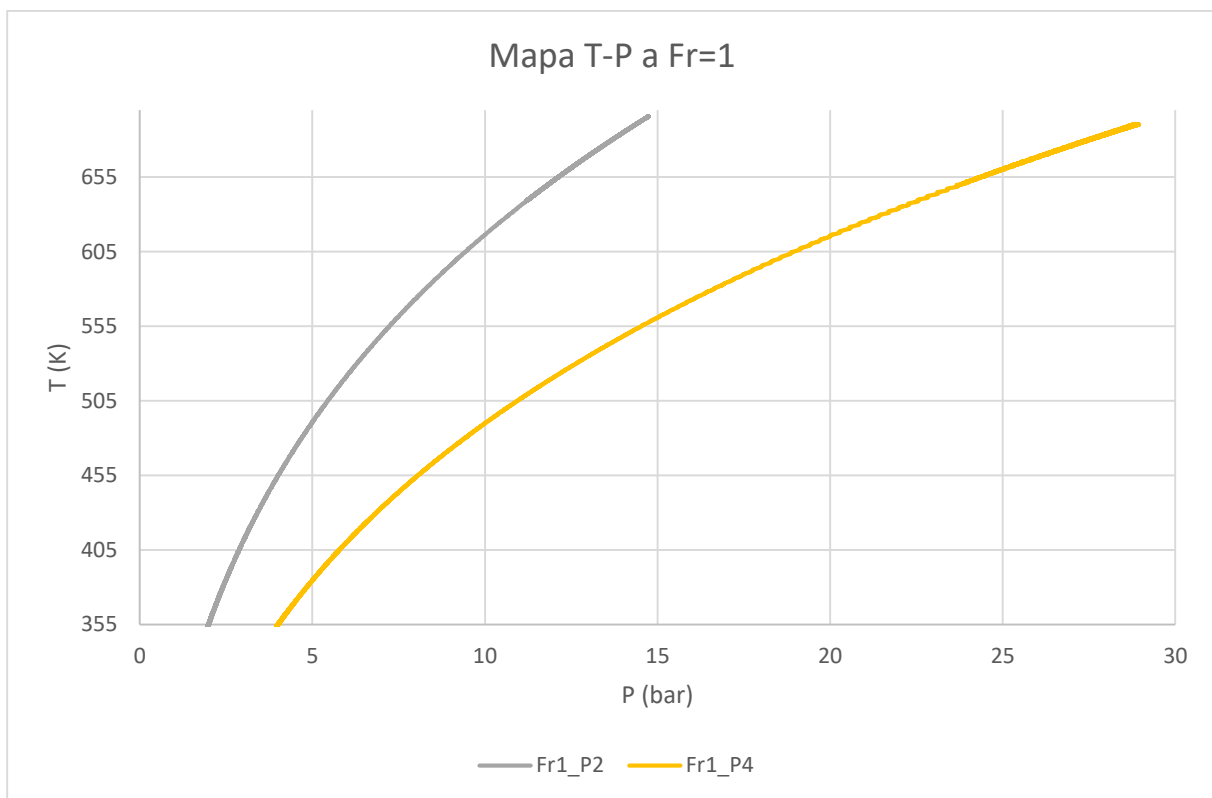


Figura 5.15. Mapa T-P a dosado 1 para observar la influencia de la presión con temperaturas constantes.

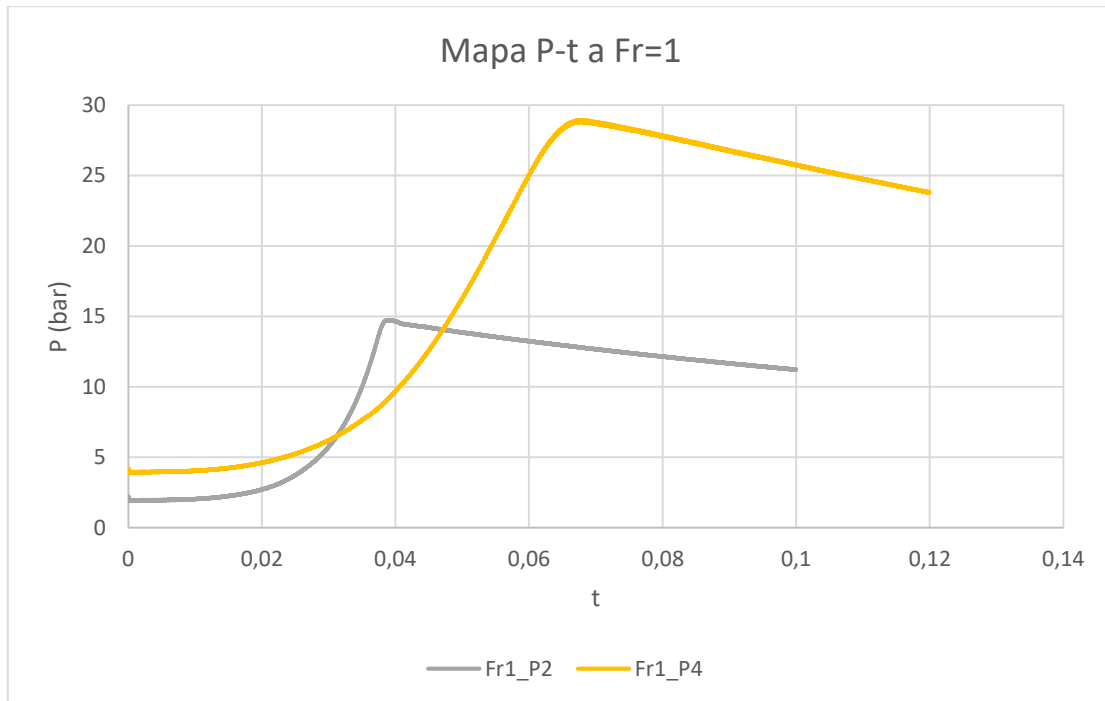


Figura 5.16. Mapa P-t a dosado 1 para observar la influencia de la presión con temperaturas constantes.

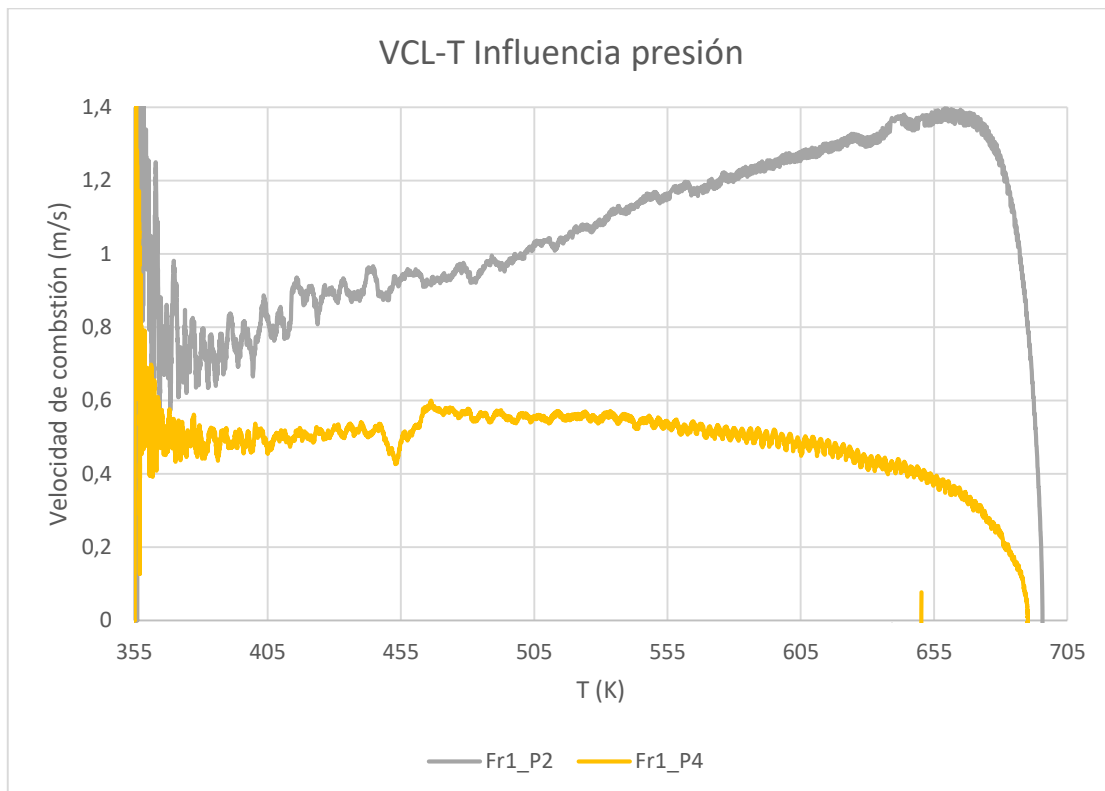


Figura 5.17. Influencia de la presión para dosado 0.9 en la velocidad de combustión a temperatura constante.

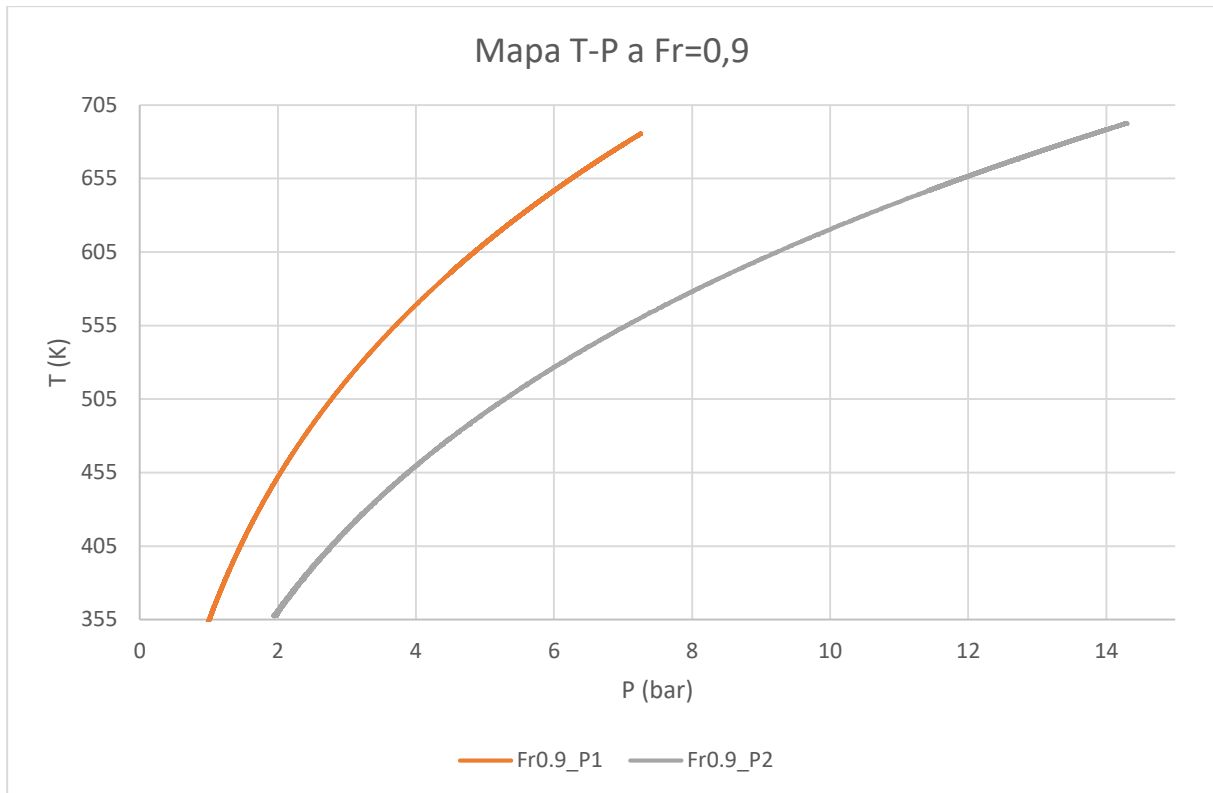


Figura 5.18. Mapa P-T a dosado 0.9 para observar la influencia de la presión con temperaturas constantes.

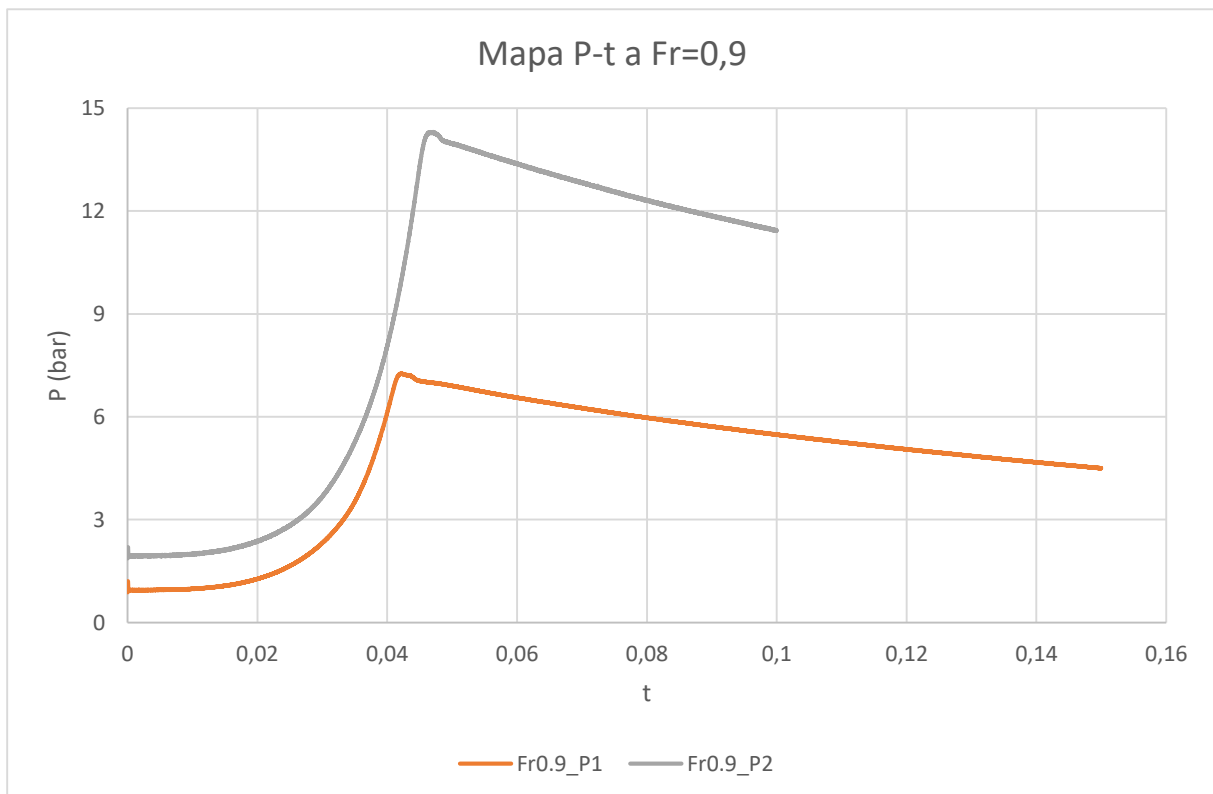


Figura 5.19. Mapa P-t a dosado 0.9 para observar la influencia de la presión con temperaturas constantes.

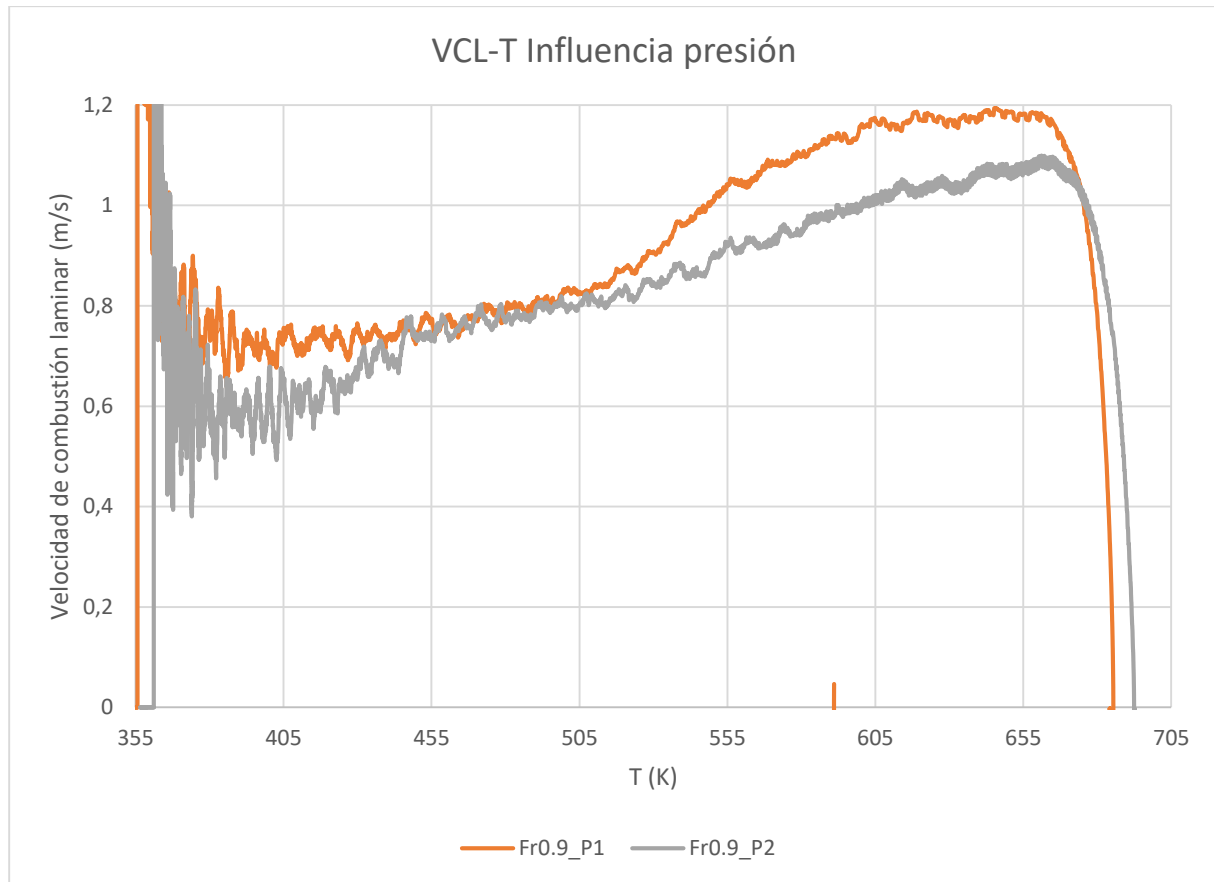


Figura 5.20. Influencia de la presión para dosado 0.9 en la velocidad de combustión laminar a temperatura constante.

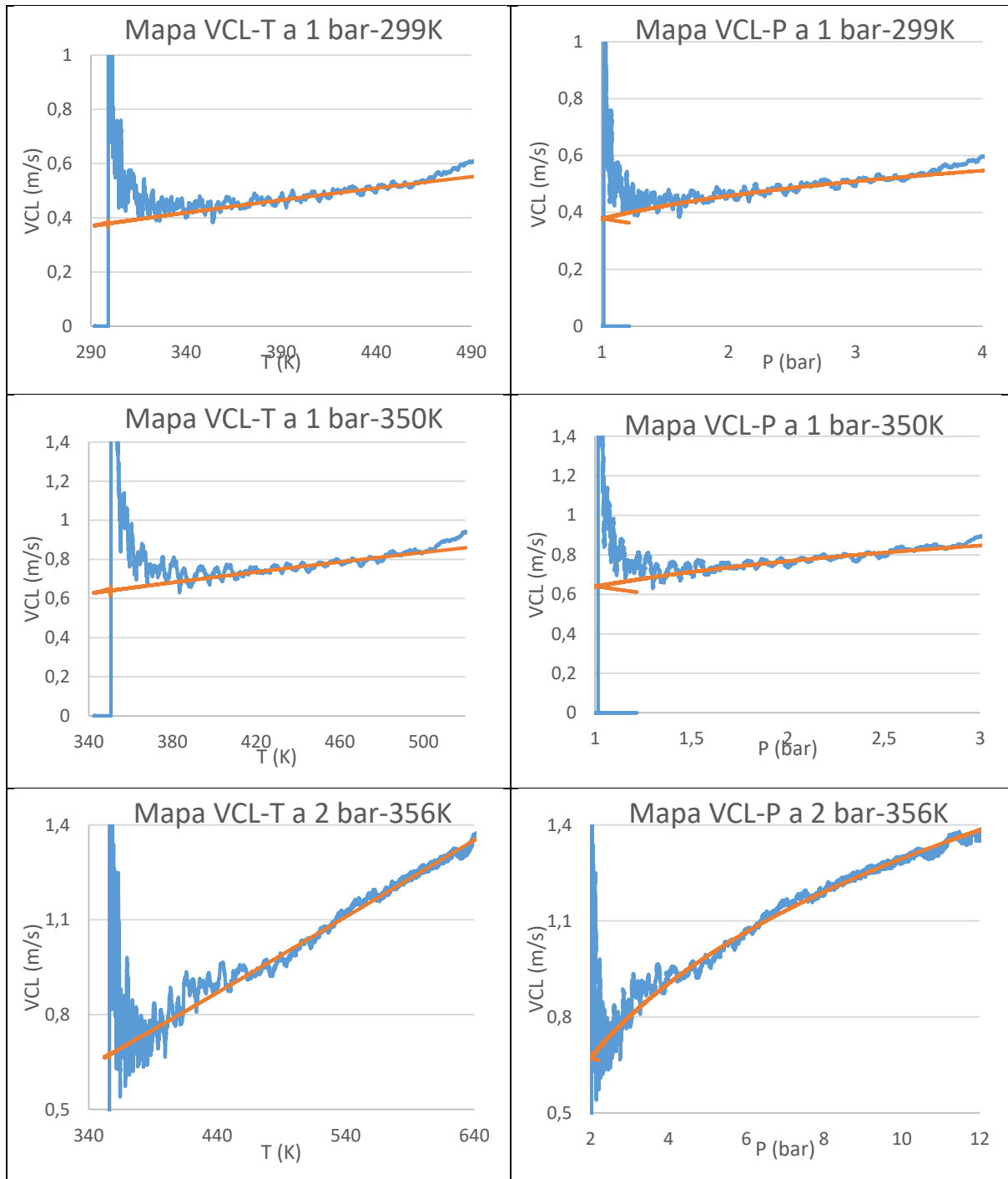
Si observamos las figuras anteriores, para todos los dosados, la evolución temporal de la presión se comporta de manera similar, a medida que la presión aumenta, la combustión se hace más lenta, y el punto de máxima presión se alcanza más tarde. Es decir, cuanto mayor es la presión en las condiciones iniciales ensayadas, menor es la velocidad de combustión laminar, lo que se ha podido comprobar en las gráficas de la influencia de la presión en la velocidad de combustión para temperatura constante.

De esta forma, y como veremos en el apartado siguiente, cuando busquemos la correlación, el coeficiente de temperatura será positivo, pues la velocidad de combustión laminar aumenta a medida que aumenta la temperatura, mientras que el coeficiente de presión será negativo, pues la velocidad de combustión laminar disminuye según aumenta la presión.

C) Barrido de dosado.

Una vez analizada la influencia de la presión y de la temperatura, se va a pasar a realizar un barrido de dosado, de manera análoga al realizado en el punto anterior de este mismo capítulo, con el fin de encontrar una correlación válida para el cálculo de la velocidad de combustión laminar en función de la presión y la temperatura.

Centrándonos en las gráficas de la velocidad de combustión laminar frente a la temperatura, y frente a la presión, observamos la línea de la ecuación de la correlación de ajuste para el rango de P y T realizado:



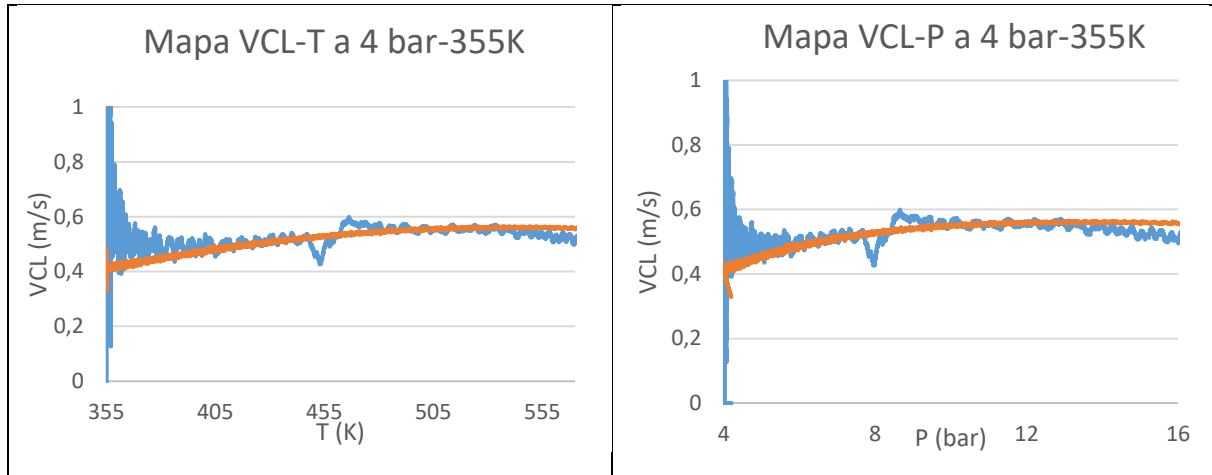


Figura 5.21. Mapa VCL-T y VCL-P a dosado 1.

La ecuación de correlación buscada tiene la siguiente forma:

$$S_u = S_{u0} * \left(\frac{T_u}{T_{u0}}\right)^\alpha * \left(\frac{p}{p_0}\right)^\beta \quad (5.3)$$

que, para facilitar su explicación, se ajusta de la siguiente manera:

$$y = a * (b)^\alpha * (c)^\beta \quad (5.4)$$

La siguiente tabla muestra los valores de los coeficientes obtenidos en la correlación, así como el ajuste R^2 :

	a	α	β	Adj-R²
CH4OFr1P1T299	0,3813	1,3899	-0,2207	0,7713
CH4OFr1P1T350	0,5106	1,4739	-0,2500	0,8368
CH4OFr1P2T356	0,5643	1,6091	-0,1425	0,9439
CH4OFr1P4T355	28,5813	14,6252	-4,8313	0,3904

Tabla 5.4. Valores de coeficientes para la correlación dosado 1.

Una vez obtenidos los coeficientes de la correlación para cada combustión, se busca encontrar unos coeficientes de temperatura y presión válidos genéricos para cualquier combustión:

$$\alpha = 1.4909$$

$$\beta = -0.2044$$

Si comparamos los valores de los coeficientes de presión y temperatura con los obtenidos por *Metghalchi & Keck (1982)* [11] y por *Saeed & Stone (2004)* [14], vemos que nuestros valores se aproximan bastante, por lo que podemos asegurar la validez de nuestros experimentos:

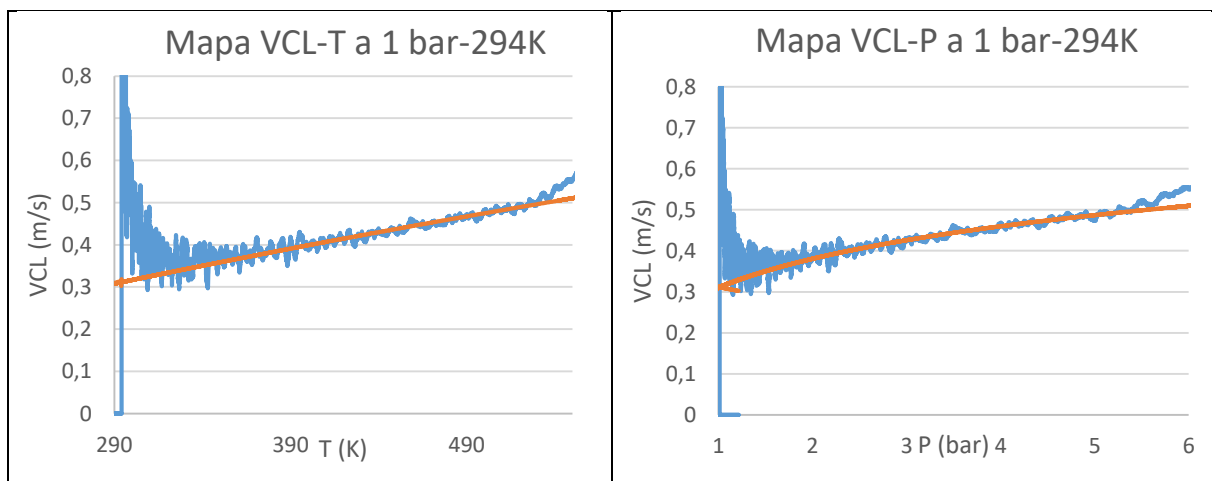
Estudio	α	β
<i>Metghalchi & Keck (1982)</i>	2.11	-0.13
<i>Saeed & Stone (2004)</i>	1.3209	-0.1807
<i>Presente trabajo</i>	1.4909	-0.2044

Tabla 5.5. Comparativa entre los valores de los coeficientes de la correlación.

Las comparaciones con las correlaciones propuestas por *Metghalchi & Keck* y *Saeed & Stone* para la presión y temperatura variables, muestran que nuestros valores son más cercanos a *Saeed & Stone*, ya que *Metghalchi & Keck* sobreestiman las velocidades de combustión para un rango de presiones y temperaturas variables.

D) Dosado Fr=0.9

Centrándonos en las gráficas de la velocidad de combustión laminar frente a la temperatura, y frente a la presión, observamos la línea de la ecuación de la correlación de ajuste para el rango de P y T realizado:



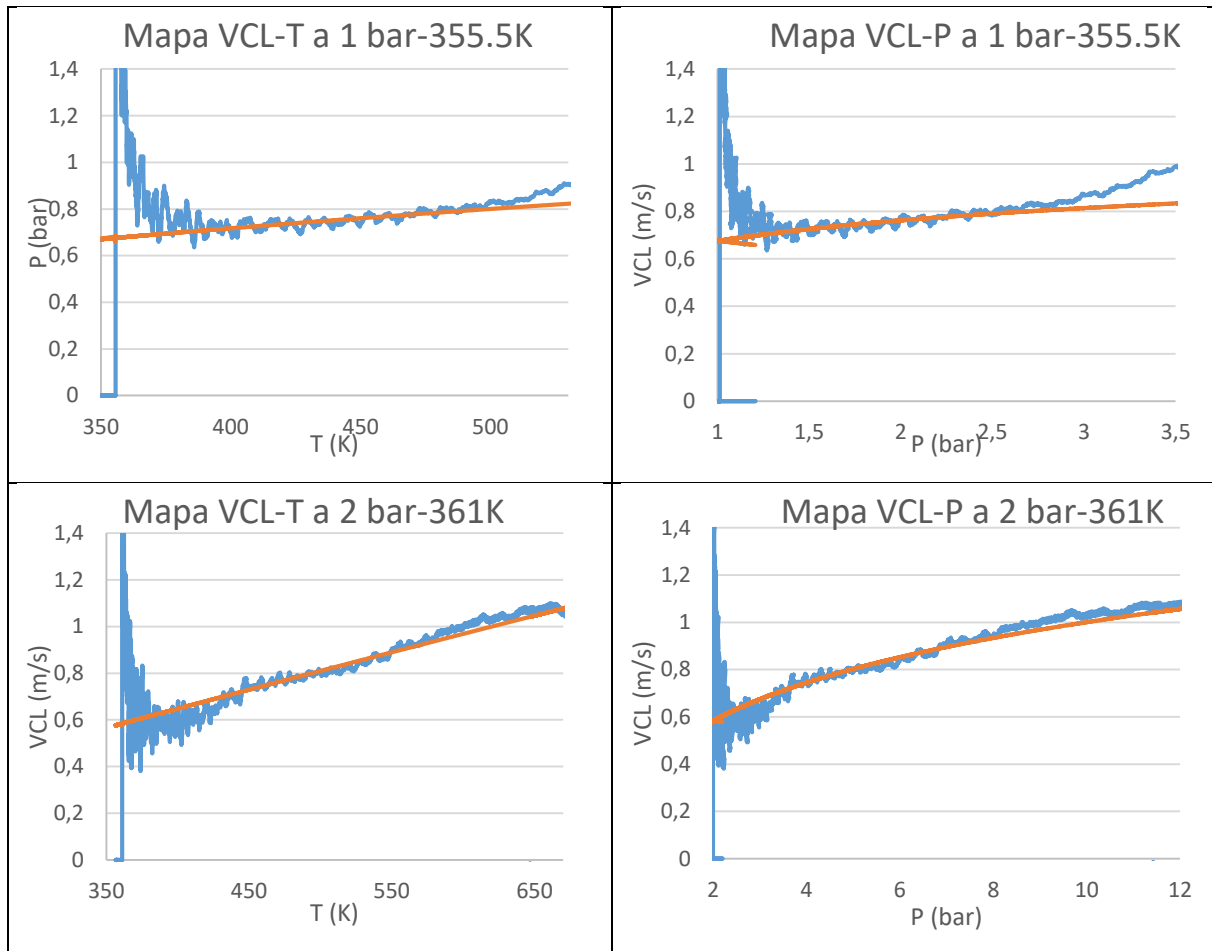


Figura 5.22. Mapa VCL-T y VCL-P a dosado 0.9.

La ecuación de correlación buscada tiene la siguiente forma:

$$S_u = S_{u0} * \left(\frac{T_u}{T_{u0}}\right)^\alpha * \left(\frac{p}{p_0}\right)^\beta \quad (5.5)$$

que, para facilitar su explicación, se ajusta de la siguiente manera:

$$y = a * (b)^\alpha * (c)^\beta \quad (5.6)$$

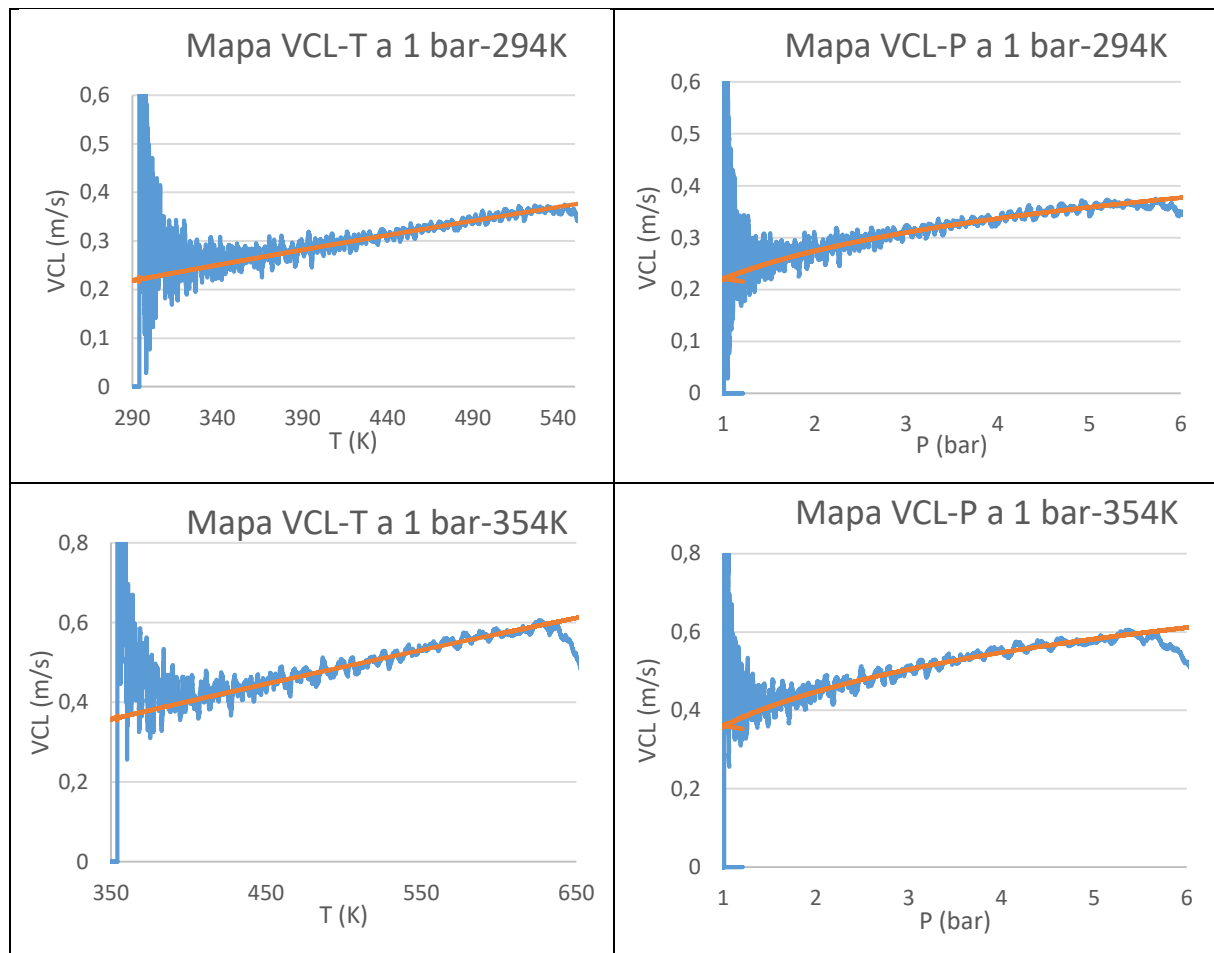
La siguiente tabla muestra los valores de los coeficientes obtenidos en la correlación, así como el ajuste R^2 :

	a	α	β	Adj-R ²
CH4OFr0,9P1T393	0,32	1,5245	-0,2210	0,8935
CH4OFr0,9P1T355,5	0,5571	1,5447	-0,2254	0,8613
CH4OFr0,9P2T361	0,4998	1,6832	-0,2305	0,9379

Tabla 5.6. Valores de coeficientes para la correlación dosado 0.9.

E) Dosado $Fr=0.8$

Centrándonos en las gráficas de la velocidad de combustión laminar frente a la temperatura, y frente a la presión, observamos la línea de la ecuación de la correlación de ajuste para el rango de P y T realizado:



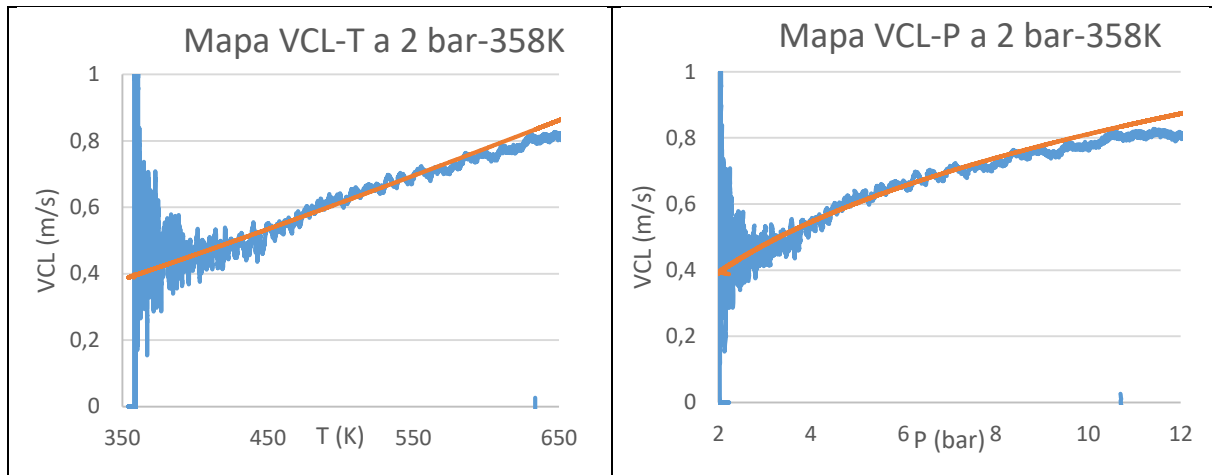


Figura 5.23. Mapa VCL-T y VCL-P a dosado 0.8.

La ecuación de correlación buscada tiene la siguiente forma:

$$S_u = S_{u0} * \left(\frac{T_u}{T_{u0}}\right)^\alpha * \left(\frac{p}{p_0}\right)^\beta \quad (5.7)$$

que, para facilitar su explicación, se ajusta de la siguiente manera:

$$y = a * (b)^\alpha * (c)^\beta \quad (5.8)$$

La siguiente tabla muestra los valores de los coeficientes obtenidos en la correlación, así como el ajuste R^2 :

	a	α	β	Adj-R ²
CH4OFr0,8P1T394	0,2272	1,5481	-0,2458	0,8358
CH4OFr0,8P1T354	0,2767	1,5853	-0,2420	0,8577
CH4OFr0,8P2T358	0,3249	2,0563	-0,2515	0,9435

Tabla 5.7. Valores de coeficientes para la correlación dosado 0.8.

Una vez obtenidos los coeficientes de la correlación para cada combustión, se busca encontrar unos coeficientes de temperatura y presión válidos genéricos para cualquier combustión, en función del dosado:

Fr	Su0	α	β
1	0,40	1,4909	-0,2044
0,9	0,33	1,5841	-0,2256
0,8	0,24	1,7299	-0,2464

Tabla 5.8. Valores de coeficientes para la correlación en función del dosado

Los coeficientes α y β se pueden escribir mediante la siguiente expresión en función del dosado:

$$\alpha = A_{\alpha} + B_{\alpha}(\phi - 1) = 1,4980 - 0,9(\phi - 1) \quad (5.9)$$

$$\beta = A_{\beta} + B_{\beta}(\phi - 1) = -0.2054 + 0.21(\phi - 1) \quad (5.10)$$

La velocidad de referencia S_{u0} , también se puede escribir de la siguiente manera en función del dosado:

$$S_{u0} = S_{u01} + S_{u02}(\phi - \phi_m)^2 = 0,385 - 3,75 (\phi - 1)^2 \quad (5.11)$$

5.3 Estudio de la morfología de las llamas de metanol en una bomba de combustión cilíndrica.

En este apartado se busca una caracterización óptica de las combustiones laminares de mezclas metanol-aire, con el fin de investigar la aparición de inestabilidades celulares y cuantificar su intensidad. Se han realizados experimentos con diferentes relaciones metanol-aire en una bomba de combustión de volumen constante cilíndrica con encendido centrado y ventanas transparentes. El desarrollo de la llama y la formación de arrugas en su superficie se registran con una técnica de Schlieren. Este fenómeno se cuantifica mediante un índice de densidad de celularidad. La presión durante la combustión se registra mediante un transductor piezoeléctrico, y su señal es tratada por medio de un modelo de diagnóstico de dos zonas.

Si se considera la llama laminar como una superficie pasiva, es decir, como una interfaz infinitamente delgada que separa los gases quemados de menor densidad de los gases no quemados con mayor densidad. Un arrugamiento de la llama no afectará a la intensidad de la llama, sino que aumentará la velocidad de combustión volumétrica por el aumento del área de la llama. La discontinuidad de la densidad provoca una inestabilidad hidrodinámica. Esta inestabilidad se determina principalmente por la relación de densidades de las regiones quemada y sin quemar, y el grosor de la llama [27].

Los diferentes experimentos se realizaron en una bomba cilíndrica de volumen constante, con un diámetro de 114 mm y una altura de 135 mm para observar el desarrollo de la combustión, y en particular, la aparición de celularidad. La cámara de combustión posee dos ventanas ópticas hechas de sílice fundida sobre las paredes laterales del cilindro.

La siguiente matriz muestra las imágenes Schlieren de la expansión de las combustiones metanol-aire para diferentes dosados (0.9-1.2), para una presión de 1 bar y 300 K de temperatura.

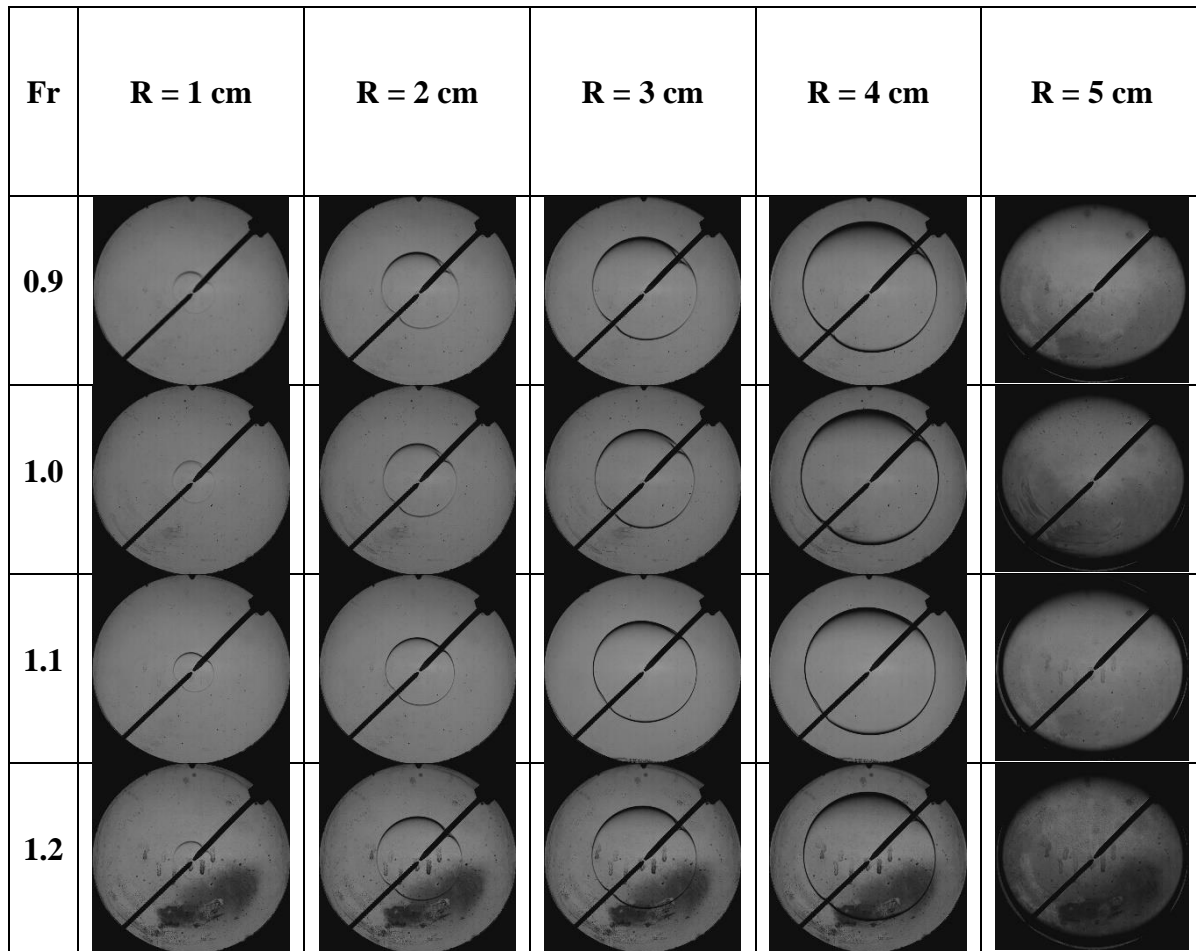


Figura 5.24. Imágenes Schlieren de la combustión para barrido de dosado.

Como se puede observar en las imágenes, todas las combustiones de las mezclas metanol-aire, para dosados 0.9-1.2, a temperatura de 300 K y presión de 1 bar, son completamente laminares.

Para intentar buscar una combustión con tendencia a la celularidad, se ha ido aumentando hasta temperaturas de unos 340 K para dosados ricos. Las siguientes imágenes muestran la existencia de celularidad para una relación metanol-aire de 1.2, temperatura de 340 K y presión de 1 bar.

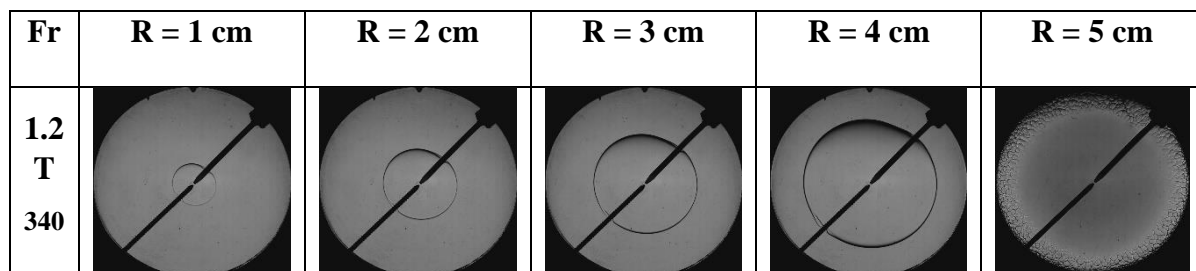


Figura 5.25. Imágenes Schlieren a Fr=1.2 y 340 K

Si observamos la última imagen, se observa que la mezcla tiende a la celularidad, al producirse el contacto de la llama con la pared de la bomba.

Por tanto, podemos concluir que las imágenes del proceso de combustión de metanol en las condiciones de presión y temperatura ensayadas son laminares, y no existen inestabilidades que desarrollen celularidad en la llama.

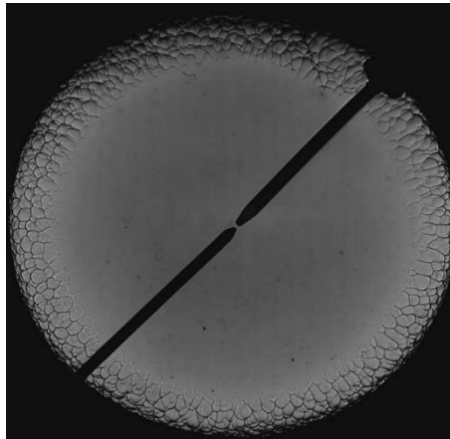


Figura 5.26. Celularidad en la combustión.



Universidad de Valladolid

DISEÑO DE UN ACCESO ÓPTICO EN UNA BOMBA DE
COMBUSTIÓN A VOLUMEN CONSTANTE Y
CARACTERIZACIÓN DE METANOL



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial



CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

6.1 Conclusiones.

En el presente Trabajo Fin de Máster se ha realizado un diseño de dos accesos ópticos en una bomba de combustión a volumen constante con geometría esférica, y se ha realizado un estudio del proceso de combustión premezclada del combustible metanol bajo diferentes condiciones de presión y temperatura, a través de la determinación de la velocidad de combustión laminar durante el transcurso del proceso de combustión.

Para abordar este trabajo, se han utilizado tanto herramientas experimentales como modelos teóricos de análisis y diagnóstico. Con todo ello, se han alcanzado los objetivos planteados al comienzo del documento.

Conclusiones generales

Las conclusiones obtenidas en el presente TFM son las siguientes:

- Se ha realizado una revisión bibliográfica sistemática que incluye el estado del arte actual de la utilización de metanol en motores de combustión interna alternativos, y del proceso de combustión del combustible metanol así como de su velocidad de combustión.
- Se ha diseñado una modificación de la actual bomba de combustión esférica para posibilitar la detección de la quimioluminiscencia emitida por la llama durante el proceso de combustión. Esta modificación consiste en el diseño de dos accesos ópticos, uno radial y otro horizontal para mejorar los existentes y permitir la utilización de técnicas de diagnóstico óptico en la bomba de combustión esférica.
- En la caracterización del proceso de combustión premezclada, de metanol, se ha detectado la presión durante el proceso de combustión, la cual se ha utilizado como entrada en un modelo de diagnóstico de dos zonas.
- El modelo de diagnóstico de dos zonas permite, a partir del análisis de la presión medida experimentalmente, obtener las variables que intervienen en el proceso de combustión, posibilitando una caracterización cuantitativa del proceso de combustión convencional. Es un modelo flexible que permite la utilización de diferentes combustibles, gases y líquidos, mezclas y simples, de una manera rápida y sencilla.
- Se ha realizado un estudio morfológico del proceso de combustión de metanol en una bomba de combustión cilíndrica instrumentada con dos amplios accesos ópticos que permiten la utilización de la Técnica Schlieren para grabar las imágenes del proceso de combustión. A través de este estudio, se ha visto que, en las condiciones ensayadas, la combustión de metanol es completamente laminar, y no se observan indicios de celularidad en las mismas.



Conclusiones específicas

Los resultados más llamativos con respecto a la modificación del diseño de la bomba de combustión esférica son los siguientes:

- Se ha realizado el diseño de la bomba de combustión esférica actual en el software Fusion360 de Autodesk.
Y en dicho diseño se ha realizado la modificación de los actuales accesos ópticos para mejorar la detección de la quimioluminiscencia.
- El acceso óptico radial se ha diseñado más amplio, con las siguientes dimensiones: Taladro pasante con rosca M14x1.25, taladro ciego de 28 mm de diámetro y profundidad de 13.16 mm, como se muestra en los planos adjuntos en el Anexo: Planos. El acceso óptico horizontal tiene las siguientes dimensiones: Taladro pasante con rosca M14x1.25, taladro ciego de 28 mm de diámetro y 34.95 mm de profundidad, como también se detalla en el anexo. En dichos accesos ópticos es necesario introducir un tornillo especial para poder colocar en el mismo el cristal.
- Los tornillos para la introducción de los cristales en los accesos ópticos han sido diseñados, de manera que se componen de dos partes, un primer tornillo de cabeza hexagonal de 12.5 mm de lado, de longitud total 38 mm y rosca M14x1.25, en el que se realiza un taladro interno de 9 mm de diámetro y 36 mm de profundidad donde irán situados tanto las juntas de vitón como el cristal, a continuación se coloca un tubo cilíndrico de acero de 20 mm de longitud, y 9 mm de diámetro, y finalmente un segundo tornillo de cabeza hexagonal de 12.5 mm de lado, longitud de 21 mm con rosca M10x1, tal y como se muestra en los planos adjuntos.
- Se ha estudiado de esfuerzos en la bomba de combustión con los nuevos accesos ópticos para verificar la seguridad de la misma.
- La elección del cristal a utilizar se ha basado en las propiedades del mismo. Tanto las propiedades físicas, térmicas como químicas hacen que el cuarzo sea un material apto para la aplicación bajo las condiciones de la cual se va a utilizar, destacando de entre sus propiedades principalmente la temperatura máxima de utilización continua, pues es muy superior a la que va a estar sometido. Este cristal posee las siguientes dimensiones: 9 mm de diámetro y 4 mm de espesor.
- Para las juntas, se han seleccionado juntas tóricas por sus ventajas frente a otros sistemas de estanqueidad, el material empleado es vitón, que presenta una gran resistencia a elevadas temperaturas, óptima resistencia química, y es especialmente recomendado para aplicaciones en contacto con carburantes. Estas juntas de vitón tienen un diámetro exterior de 9 mm y 1 mm de espesor.

Como resultados y conclusiones específicas de la metodología utilizada para la caracterización del proceso de combustión de metanol, se destacan:

- Se ha validado la instalación experimental para la determinación de la velocidad de combustión del metanol. Para validar los resultados obtenidos se ha determinado la

velocidad de combustión del metanol para dosados entre (0.7 y 1.2), en condiciones ambientales. Estos resultados muestran que la velocidad de combustión crece a medida que aumenta el dosado, hasta llegar a un máximo correspondiente a $Fr=1.1$, para posteriormente disminuir esta velocidad al seguir aumentando el dosado.

- Se ha realizado un estudio paramétrico de la velocidad de combustión laminar, realizándose experimentos en diferentes condiciones de presión (1,2 y 4 bar) y de temperatura (21-25°C y 80-85°C).
- La velocidad de combustión crece con la temperatura inicial, el dosado de la mezcla y en cambio decrece a medida que aumenta la presión inicial.
- Se han determinado correlaciones para la velocidad de combustión del metanol, tipo Metghalchi-Keck en los que los coeficientes obtenidos son del mismo orden que los obtenidos en la bibliografía.
- Se ha realizado un estudio morfológico de la combustión del metanol en una bomba de volumen constante cilíndrica mediante la técnica Schlieren en las condiciones de 1 bar de presión y 300 K de temperatura para un barrido de dosado entre 0.9 y 1.2. Las imágenes registradas muestran como su desarrollo es completamente laminar para todos los dosados ensayados. Posteriormente se aumentó la temperatura de los experimentos en busca de celularidad en el desarrollo de la combustión, apareciendo esta celularidad, para un dosado de 1.2 y 340 K de temperatura, una vez el frente de llama choca con las paredes de la bomba, siendo toda la combustión completamente laminar.

6.2 Desarrollo de trabajos futuros.

Desde el principio el trabajo fin de máster se planteó con el objetivo principal de mejorar los accesos ópticos existentes en la instalación tras la primera modificación, con el fin de poder medir de una mejor manera, la radiación quimio-luminiscente de la combustión.

Es por ello, que se ha realizado este proyecto, para que sirva de motivación a desarrollos futuros que estén encuadrados en la línea de esta investigación.

De esta manera, un trabajo futuro sería la caracterización de la mezcla metanol-aire en una bomba de combustión de volumen constante, mediante el estudio de la quimio-luminiscencia detectada a través de los nuevos accesos ópticos diseñados en este TFM. La tasa máxima de liberación de calor y la temperatura de la llama se correlacionan con las emisiones de quimioluminiscencia, por lo que estas señales, se pueden utilizar para monitorizar el proceso de combustión, de una manera más completa, que utilizando solo los datos de presión, que mediante un modelo de diagnóstico termodinámico de dos zonas, permite obtener parámetros característicos como la velocidad de combustión, las temperaturas de los gases quemados y sin quemar o la liberación de calor.



La utilización de otros combustibles, alcoholes, como el etanol, entre otros, también sería un trabajo a realizar en el futuro y de esta forma poder comparar con los resultados obtenidos en este trabajo.

6.3 Aportaciones realizadas.

Las aportaciones realizadas en este proyecto fin de máster, a la línea de investigación llevada a cabo desde la sección de Máquinas y Motores Térmicos, perteneciente al Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica (IEF) de la Universidad de Valladolid, que analiza el uso de combustibles alternativos, en motores de combustión interna (principalmente MCIA), se han basado principalmente en el cumplimiento de los objetivos para los que este TFM fue formulado, y que se han detallado a lo largo de este documento.

Por una parte, se ha diseñado una modificación de la tapa de la bomba de combustión, con el fin de mejorar los accesos ópticos existentes hasta el momento para posibilitar una mejor detección de la quimioluminiscencia emitida durante la combustión. Además del diseño de los dos taladros, se ha diseñado el mecanismo, formado por dos tornillos, dos juntas de vitón, el cristal de cuarzo, y un tubo cilíndrico, donde irán situados los fotomultiplicadores, permitiendo de esta manera, un mejor acceso al cristal en caso de deterioro o rotura del mismo.

Por otro lado, se ha caracterizado cuantitativamente el proceso de combustión del metanol a partir de su velocidad de combustión laminar, mediante la utilización de un modelo termodinámico de diagnóstico de dos zonas. De esta manera se han validado los resultados obtenidos experimentalmente, con los resultados obtenidos por otros autores recogidos en la bibliografía.



ANEXO: PLANOS



Universidad de Valladolid

DISEÑO DE UN ACCESO ÓPTICO EN UNA BOMBA DE
COMBUSTIÓN A VOLUMEN CONSTANTE Y
CARACTERIZACIÓN DE METANOL



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial



BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Flood, "Laminar burning velocity of methanol mixed with formaldehyde and statistical examination of heat flux burners," 2011.
- [2] S. Verhelst, J. W. Turner, L. Sileghem, and J. Vancoillie, "Methanol as a fuel for internal combustion engines," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 70, pp. 43–88, 2019.
- [3] O. I. Awad *et al.*, "Alcohol and ether as alternative fuels in spark ignition engine: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. September 2017, pp. 2586–2605, 2018.
- [4] H. A. K. Shahad and S. K. Wabdan, "Effect of operating conditions on pollutants concentration emitted from a spark ignition engine fueled with gasoline bioethanol blends," *J. Renew. Energy*, vol. 2015, 2015.
- [5] M. Ghazikhani, M. Hatami, B. Safari, and D. D. Ganji, "Experimental investigation of performance improving and emissions reducing in a two stroke SI engine by using ethanol additives," *Propuls. Power Res.*, vol. 2, no. 4, pp. 276–283, 2013.
- [6] X. Gu, Z. Huang, J. Cai, J. Gong, X. Wu, and C. Lee, "Emission characteristics of a spark-ignition engine fuelled with gasoline-n-butanol blends in combination with EGR," *Fuel*, vol. 93, pp. 611–617, 2012.
- [7] A. Katoch, M. Asad, S. Minaev, and S. Kumar, "Measurement of laminar burning velocities of methanol-air mixtures at elevated temperatures," *Fuel*, vol. 182, pp. 57–63, 2016.
- [8] J. Vancoillie, S. Verhelst, and J. Demuynck, "Laminar Burning Velocity Correlations for Methanol-Air and Ethanol-Air Mixtures Valid at SI Engine Conditions," *SAE Tech. Pap. Ser.*, vol. 1, 2011.
- [9] G. J. Gibbs and H. F. Calcote, "Effect of Molecular Structure on Burning Velocity," *J. Chem. Eng. Data*, vol. 4, no. 3, pp. 226–237, Jul. 1959.
- [10] T. W. Ryan III and S. S. Lestz, "The laminar burning velocity of isooctane, n-heptane, methanol, methane, and propane at elevated temperature and pressures in the presence of a diluent," *SAE Trans.*, pp. 652–664, 1980.
- [11] M. Metghalchi and J. C. Keck, "Burning velocities of mixtures of air with methanol, isooctane, and indolene at high pressure and temperature," *Combust. Flame*, vol. 48, pp. 191–210, 1982.
- [12] Ö. L. Gulder, "Laminar burning velocities of methanol, isooctane and isooctane/methanol blends," *Combust. Sci. Technol.*, vol. 33, no. 1–4, pp. 179–192, 1983.
- [13] F. N. EGOLFOPOULOS, D. X. DU, and C. K. LAW, "A Comprehensive Study of Methanol Kinetics in Freely-Propagating and Burner-Stabilized Flames, Flow and Static Reactors, and Shock Tubes," *Combust. Sci. Technol.*, vol. 83, no. 1–3, pp. 33–75, May 1992.
- [14] K. Saeed and C. R. Stone, "Measurements of the laminar burning velocity for mixtures



- of methanol and air from a constant-volume vessel using a multizone model,” *Combust. Flame*, vol. 139, no. 1, pp. 152–166, 2004.
- [15] S. Y. Liao, D. M. Jiang, Z. H. Huang, W. D. Shen, C. Yuan, and Q. Cheng, “Laminar burning velocities for mixtures of methanol and air at elevated temperatures,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 48, no. 3, pp. 857–863, 2007.
- [16] S. Y. Liao, D. M. Jiang, Z. H. Huang, and K. Zeng, “Characterization of laminar premixed methanol–air flames,” *Fuel*, vol. 85, no. 10, pp. 1346–1353, 2006.
- [17] Z. Zhang, Z. Huang, X. Wang, J. Zheng, H. Miao, and X. Wang, “Combustion characteristics of methanol–air and methanol–air–diluent premixed mixtures at elevated temperatures and pressures,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 29, no. 13, pp. 2680–2688, 2009.
- [18] P. Veloo, Y. L. Wang, F. Egolfopoulos, and C. K. Westbrook, *A comparative experimental and computational study of methanol, ethanol, and n-butanol flames*, vol. 157. 2010.
- [19] S. Jerzembeck, N. Peters, P. Pepiot-Desjardins, and H. Pitsch, “Laminar burning velocities at high pressure for primary reference fuels and gasoline: Experimental and numerical investigation,” *Combust. Flame*, vol. 156, no. 2, pp. 292–301, 2009.
- [20] Y. Huang, C. J. Sung, and J. A. Eng, “Laminar flame speeds of primary reference fuels and reformer gas mixtures,” *Combust. Flame*, vol. 139, no. 3, pp. 239–251, 2004.
- [21] S. G. DAVIS and C. K. LAW, “Determination of and Fuel Structure Effects on Laminar Flame Speeds of C1 to C8 Hydrocarbons,” *Combust. Sci. Technol.*, vol. 140, no. 1–6, pp. 427–449, Dec. 1998.
- [22] D. Iglesias Hoyos, “Metodología para el estudio de propiedades de combustión de sustancias líquidas a partir de ensayos en bomba de combustión a volumen constante,” Universidad de Valladolid, 2008.
- [23] D. Sopena Escario, “Diseño y construcción de una instalación para la medida de la velocidad de combustión laminar en mezclas de gases combustibles,” Universidad de Valladolid, 2001.
- [24] HoseCo, “Catálogo juntas tóricas.”
- [25] “Propiedades Cuarzo-Fundido.” [Online]. Available: <http://www.goodfellow.com/S/Cuarzo-Fundido.html>.
- [26] M. Reyes, F. V. Tinaut, A. Horrillo, and A. Lafuente, “Experimental characterization of burning velocities of premixed methane–air and hydrogen–air mixtures in a constant volume combustion bomb at moderate pressure and temperature,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 130, pp. 684–697, 2018.
- [27] F. V. Tinaut, M. Reyes, A. Melgar, and B. Giménez, “Optical characterization of hydrogen–air laminar combustion under cellularity conditions,” *Int. J. Hydrogen Energy*, no. xxxx, 2018.



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 2.1. Comparativa velocidad de combustión laminar de diferentes combustibles.....	20
Figura 3.1. Base de la bomba en la instalación existente.....	22
Figura 3.2. Tapa de la bomba en la instalación existente.	23
Figura 3.3. Esquema del modelo de dos zonas. [22].....	29
Figura 4.1. Dimensiones taladro horizontal instalación existente.	31
Figura 4.2. Modificación taladro horizontal.	32
Figura 4.3. Detalles espesor taladro horizontal.	33
Figura 4.4. Dimensiones taladro radial instalación existente.	33
Figura 4.5. Modificación taladro radial.	34
Figura 4.6. Simulación resistencia térmica.....	35
Figura 4.7. Diseño del primer tornillo.	35
Figura 4.8. Diseño del segundo tornillo.....	36
Figura 4.9. Diseño del tubo de acero.	36
Figura 4.10. Junta de vitón.	38
Figura 4.11. Montaje conjunto tornillos, juntas y cristal.	40
Figura 5.1. Evolución temporal de la presión para combustiones de metanol en condiciones ambientales y para diferentes dosados	44
Figura 5.2. Evolución de la temperatura frente a la presión para diferentes dosados.....	45
Figura 5.3. Evolución de las velocidades de combustión laminar frente a la temperatura para el barrido de dosado.	46
Figura 5.4. Velocidad de combustión laminar y curva de ajuste para el barrido de dosado.	47
Figura 5.5. Comparativa de velocidades de combustión laminar de metanol obtenidas por diferentes autores.	49
Figura 5.6. Mapa T-P a dosado 1 para observar la influencia de la temperatura con presiones constantes.	51
Figura 5.7. Mapa P-t a dosado 1 para observar la influencia de la temperatura con presiones constantes.	52
Figura 5.8. Influencia de la temperatura para dosado 1 en la velocidad de combustión a presión constante.....	52
Figura 5.9. Mapa T-P a dosado 0.9 para observar la influencia de la temperatura con presiones constantes.	53
Figura 5.10. Mapa P-t a dosado 0.9 para observar la influencia de la temperatura con presiones constantes.	54
Figura 5.11. Influencia de la temperatura para dosado 0.9 en la velocidad de combustión laminar a presión constante.....	54
Figura 5.12. Mapa T-P a dosado 0.8 para observar la influencia de la temperatura a presiones constantes.	55
Figura 5.13. Mapa P-t a dosado 0.8 para observar la influencia de la temperatura a presiones constantes.	56
Figura 5.14. Influencia de la temperatura para dosado 0.8 en la velocidad de combustión laminar a presión constante.....	56



Figura 5.15. Mapa T-P a dosado 1 para observar la influencia de la presión con temperaturas constantes.	57
Figura 5.16. Mapa P-t a dosado 1 para observar la influencia de la presión con temperaturas constantes.	58
Figura 5.17. Influencia de la presión para dosado 0.9 en la velocidad de combustión a temperatura constante.	58
Figura 5.18. Mapa P-T a dosado 0.9 para observar la influencia de la presión con temperaturas constantes.	59
Figura 5.19. Mapa P-t a dosado 0.9 para observar la influencia de la presión con temperaturas constantes.	59
Figura 5.20. Influencia de la presión para dosado 0.9 en la velocidad de combustión laminar a temperatura constante.	60
Figura 5.21. Mapa VCL-T y VCL-P a dosado 1.	62
Figura 5.22. Mapa VCL-T y VCL-P a dosado 0.9.	64
Figura 5.23. Mapa VCL-T y VCL-P a dosado 0.8.	66
Figura 5.24. Imágenes Schlieren de la combustión para barrido de dosado.	68
Figura 5.25. Imágenes Schlieren a $Fr=1.2$ y 340 K	68
Figura 5.26. Celularidad en la combustión.	69



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Efectos de los alcoholes en la combustión. [3].....	13
Tabla 2.2. VCL para diferentes combustibles.	19
Tabla 3.1. Características materiales elastoméricos [24].....	37
Tabla 5.1. Valores de coeficientes de la línea de ajuste.....	47
Tabla 5.2. Valores velocidad combustión laminar en diferentes autores.....	48
Tabla 5.3. Condiciones de P y T en los experimentos realizados.	50
Tabla 5.4. Valores de coeficientes para la correlación dosado 1.	62
Tabla 5.5. Comparativa entre los valores de los coeficientes de la correlación.	63
Tabla 5.6. Valores de coeficientes para la correlación dosado 0.9.	64
Tabla 5.7. Valores de coeficientes para la correlación dosado 0.8.	66