
**ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE ENCENDIDO
CON PRE-CÁMARA MEDIANTE EL ANÁLISIS
DE LA CURVA DE PRESIÓN Y TÉCNICAS DE
VISUALIZACIÓN EN CÁMARA DE COMBUSTIÓN**



**UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**

TRABAJO FINAL DE GRADO

Santiago Caro Rueda

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Departamento de Máquinas y Motores Térmicos

Junio 2019



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño



Análisis de un sistema de encendido con pre-cámara
mediante el análisis de la curva de presión
y técnicas de visualización en cámara de combustión

Trabajo de Fin de Grado

Ingeniería Mecánica

Dirigido por el Dr. Joaquín de la Morena

Centro de Motores Térmicos. Instituto Universitario de Investigación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Universitat Politècnica de València

Junio 2019

*Hay una fuerza motriz más poderosa
que el vapor, la electricidad
y la energía atómica:
La voluntad.
A. Einstein.*

ABSTRACT

In the absence of applicability of completely emission-free solutions in the automotive sector, it is necessary to improve the engines used nowadays to drastically reduce their level of contamination without a loss of performance. With this objective, the TJI (Turbulent Jet Ignition) technology, a pre-chamber ignition system that has demonstrated its practical applicability in the field of racing vehicles, is presented.

Several studies have shown the ability of this technology to deliver the same level of performance as a conventional engine, but with a lower amount of fuel used. In this work we try to observe the influence that the geometry of the pre-chamber has on the phenomenon of combustion, through the study of the pressure curve and optical techniques.

An RCEM (Rapid Compression Expansion Machine) has been used to simulate the conditions that occur in a real engine, in order to study the behavior of TJI technology through a sweep of tests with fundamentally poor dosing conditions.

After the analysis of the results, an improvement in combustion was obtained with an offset in the axes of the opposing holes of the pre-chamber in relation to coinciding axes. In addition, with equal flow area there is an improvement in the turbulence of the jets ejected with a greater number of holes. Finally, a central hole has been shown to be detrimental to equivalence ratios of around 0.5 in the main chamber, but very effective in leaner conditions.

RESUM

Vista la falta d'aplicabilitat de solucions completament lliures d'emissions en el sector automobilístic, és necessària una millora dels motors utilitzats hui en dia per a reduir dràsticament el seu nivell de contaminació sense una pèrdua de les prestacions. Amb aquest objectiu, es presenta la tecnologia TJI (Turbulent Jet Ignition), un sistema d'encesa per pre-cambra que ha demostrat la seua aplicabilitat pràctica en l'àmbit dels vehicles de competició.

Diversos estudis han demostrat la capacitat d'aquesta tecnologia per a obtenir el mateix nivell de prestacions que un motor convencional, però amb una menor quantitat de combustible utilitzat. En aquest treball es pretén observar la influència que té la geometria de la pre-cambra en el fenomen de la combustió, per mitjà de l'estudi de la corba de pressió i tècniques òptiques.

Una RCEM (*Rapid Compression Expansion Machine*) ha sigut utilitzada per a simular les condicions que es donen en un motor real, per poder estudiar el comportament de la tecnologia TJI per mitjà d'un agranat d'assajos amb condicions de dosat fonamentalment pobre.

Realitzat l'anàlisi dels resultats, s'ha obtingut una millora en la combustió amb els eixos dels orificis de la precambra desfasats respecte a eixos coincidents. A més, es produïx una millora en la turbulència dels dolls ejectats amb un nombre més gran d'orificis, a igualtat d'àrea de pas del flux. Finalment, un orifici central ha demostrat ser perjudicial per a dosats relatius d'al voltant 0.5, però molt eficaç en dosats més pobres.

RESUMEN

Ante la falta de aplicabilidad de soluciones completamente libres de emisiones en el sector automovilístico, es necesaria una mejora de los motores utilizados hoy en día para reducir drásticamente su nivel de contaminación sin una pérdida de las prestaciones. Con este objetivo, se presenta la tecnología TJI (*Turbulent Jet Ignition*), un sistema de encendido por pre-cámara que ha demostrado su aplicabilidad práctica en el ámbito de los vehículos de competición.

Diversos estudios han demostrado la capacidad de esta tecnología para entregar el mismo nivel de prestaciones que un motor convencional, pero con una menor cantidad de combustible utilizado. En este trabajo se pretende observar la influencia que tiene la geometría de la pre-cámara en el fenómeno de la combustión, mediante el estudio de la curva de presión y técnicas ópticas.

Una RCEM (*Rapid Compression Expansion Machine*) ha sido utilizada para simular las condiciones que se dan en un motor real, para así poder estudiar el comportamiento de la tecnología TJI mediante un barrido de ensayos con condiciones de dosado fundamentalmente pobre.

Tras el análisis de los resultados, se ha obtenido una mejora en la combustión con los ejes de los orificios de la pre-cámara desfasados con respecto a ejes coincidentes. Además, se produce una mejora en la turbulencia de los chorros eyectados con un mayor número de orificios, a igualdad de área de paso del flujo. Por último, un orificio central ha demostrado ser perjudicial para dosados relativos de alrededor 0.5, pero muy eficaz en dosados más pobres.

ÍNDICE

ABSTRACT	7
1. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 MARCO GLOBAL	1
1.2 MOTIVACIÓN	4
1.3 OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DEL TRABAJO.....	5
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	7
2.1 MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVO	8
2.1.1 MOTOR DE ENCENDIDO PROVOCADO.....	10
2.1.3 MOVIMIENTO DEL AIRE EN EL CILINDRO	11
2.2 FENÓMENO DE LA COMBUSTIÓN	17
2.2.2 TIPOS DE COMBUSTIÓN	17
2.3 COMBUSTIÓN EN MEP	22
2.3.1 PROCESO DE LA COMBUSTIÓN.....	23
2.3.2 ESTUDIO GENERAL DE LA COMBUSTIÓN	24
2.3.3 CONTROL DE LA COMBUSTIÓN	26
2.3.4 KNOCK	27
2.3.5 SISTEMA DE INYECCIÓN.....	28
2.3.6 ANÁLISIS DE LA CURVA DE PRESIÓN DE UNA COMBUSTIÓN TÍPICA	31
2.4 TECNOLOGÍA TJI.....	35
2.4.1 TURBULENT JET IGNITION: GENERALIDADES	35
2.4.2 MODOS DE OPERACIÓN.....	37
2.4.3 PARÁMETROS RELEVANTES DE LA TECNOLOGÍA TJI	39
2.5 TÉCNICAS DE VISUALIZACIÓN	42
CAPÍTULO 3: EQUIPO EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA.....	45
3.1 MÁQUINA DE COMPRESIÓN-EXPANSIÓN RÁPIDA	46
3.1.1 COMPONENTES Y FUNCIONAMIENTO DE LA RCEM	47
3.1.2 SOFTWARE CAMAS	52
3.2 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL	55
3.2.1 SISTEMA DE INYECCIÓN.....	55
3.2.2 SISTEMA DE ENCENDIDO	58
3.2.3 SISTEMA DE VISUALIZACIÓN	59

3.2.4 ELEMENTOS FUNDAMENTALES DE LA INSTALACIÓN	63
3.2.5 ESQUEMA DE LA INSTALACIÓN	69
3.3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	70
3.3.1 CONDICIONES PREVIAS AL INICIO DE UN ENSAYO	70
3.3.2 PUESTA A PUNTO	71
3.3.3 PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE UN ENSAYO.....	73
3.3.4 RECOPIACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	75
3.3.5 PROCESADO DE LOS DATOS	76
3.3.6 METODOLOGÍA GENERAL DE REALIZACIÓN DEL ESTUDIO	79
CAPÍTULO 4: RESULTADOS	81
4.1 ANÁLISIS DE LAS CURVAS DE PRESIÓN.....	82
4.1.1 ANÁLISIS INICIAL	82
4.1.2 RESULTADOS: CURVAS DE PRESIÓN	84
4.2 ANÁLISIS DE LA PENETRACIÓN DE CHORROS	94
4.2.1 ANÁLISIS INICIAL	94
4.2.2 RESULTADOS: CURVAS DE PENETRACIÓN	97
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	107
APÉNDICE	109
BIBLIOGRAFÍA	114
PRESUPUESTO	119
DESGLOSE DE RECURSOS.....	119
DESGLOSE DE PRESUPUESTO.....	121
PRESUPUESTO TOTAL	123

PRIMERA PARTE
MEMORIA

1. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 MARCO GLOBAL

La obtención de energía y su transformación en movimiento mecánico o trabajo es una problemática que cobra cada vez más importancia con el paso de los años, y su complejidad no para de aumentar. Para tal fin surgieron los motores, que podrían definirse de una forma amplia como máquinas capaces de convertir energía en trabajo. Dentro del concepto de motor se engloban muchas tecnologías que aunque realicen la misma función, tienen grandes diferencias y se utilizan en distintos campos de aplicación. Este estudio estará centrado en los MCI (Motores de Combustión Interna Alternativa) que tienen una gran importancia mayormente en el sector de la automoción.

Las bases de lo que conocemos hoy como MCI, las ideó el ingeniero Nikolaus August Otto, hace 143 años, con el llamado *motor de ciclo Otto*, que supuso una gran revolución respecto a las máquinas de vapor de la época. Una década más tarde, Karl Benz patentó el primer automóvil de apenas 3 CV, y poco tiempo después Daimler fue capaz de construir el primer coche de cuatro ruedas. Sería Carnot el que sentaría las bases de la aún no nacida Termodinámica, planteando un ciclo ideal para los motores, que sería la gran inspiración para Rudolf Diésel. Este último ideó un concepto de motor con el que trataría de acercarse lo máximo posible al ideal planteado por Carnot mediante un principio de funcionamiento diferente basado en la combustión por difusión, que aumentaría el rendimiento con respecto a los motores Otto. Así, tanto el motor de *Otto* como el motor de *Diesel* evolucionarían hasta nuestros días, siendo conocidos como motores de encendido provocado (MEP) y motores de encendido por compresión (MEC), respectivamente.

A lo largo de la historia ha habido infinidad de diseños que suponen que la clasificación de los motores sea muy densa, dependiendo así de factores como dónde se realiza la combustión (combustión interna y externa), modo de funcionamiento (alternativos o rotativos), número de carreras por ciclo (2T o 4T), entre otros. Tal cantidad de diseños diferentes son creados para dar respuesta a los diferentes objetivos, problemas o necesidades que se requerían para aplicaciones de todo tipo, buscando prestaciones, rendimiento, sencillez... Pero esto no es únicamente un tema del pasado. Hoy en día siguen existiendo importantes problemáticas en el mundo del motor que necesitan ser resueltas, y por ello se siguen estudiando nuevos diseños y funcionamientos que supongan una solución a estos problemas.

En etapas más tempranas del desarrollo de los motores, el objetivo principal era la mejora de las prestaciones o bien del rendimiento, pero con el paso de los años, viendo la creciente problemática de la contaminación se genera una preocupación social por la salud del planeta y se crean normativas cada vez más estrictas para intentar disminuir las emisiones contaminantes que los motores producen. Hoy en día, el principal objetivo es, por tanto, la reducción de emisiones sin una pérdida significativa de prestaciones y rendimiento.

En los últimos cincuenta años, se han producido importantes avances en las características del motor y su funcionamiento, en la línea de lo anteriormente descrito. Quizá el avance más importante haya sido la introducción de la electrónica en el vehículo, cambiando para siempre el concepto del automóvil. Este hecho permitió mejorar prácticamente todos los sistemas del vehículo e incluso hoy en día este proceso de modernización continúa su curso, ampliando sus horizontes a proyectos como la conducción automática. En el motor ha tenido un gran impacto, permitiendo tener un control más preciso de la inyección mejorando así la eficiencia y las prestaciones. También se realiza una mejor gestión del combustible lo que ayuda en la reducción de emisiones.

Por otra parte, otra de las tendencias más importantes es el paso a la inyección directa, que, frente a la inyección indirecta tradicional, permite mayores relaciones de compresión y por tanto aumentando el rendimiento. La aparición de los motores sobrealimentados en el sector automovilístico, aunque fue tardía comparada con otros sectores como el naval o el de aviación, supuso una gran mejora en la capacidad de producir trabajo por parte del motor, pues mediante una turbo-máquina se consigue introducir más aire en los cilindros y aumentar la presión de inyección, lo que supone un incremento en las prestaciones del motor.

En el caso particular de los motores de encendido provocado, técnicas como el control sobre cruce de válvulas a través de mecanismos de distribución variable o el control optimizado sobre el punto de encendido, también han permitido una mejora significativa de las prestaciones y un mayor control sobre el proceso de combustión. Una de las últimas tendencias de mejora es el llamado *downsizing* surgido del deseo de los fabricantes por seguir ofreciendo las mismas prestaciones o superiores, pero con unas emisiones muy inferiores. Consiste en el uso conjunto de sobrealimentación e inyección directa, consiguiendo un motor de tamaño reducido, pero con las mismas prestaciones que un motor tradicional. Otras técnicas que se están explorando son el VCR (*Variable Compression Ratio*) que realiza un control activo de la relación de compresión dependiendo del grado de carga en el que se encuentre, con el fin de que ésta se reduzca solo en aquellas condiciones en las que sea necesario para garantizar una mayor resistencia al autoencendido o *knock*.

Dentro del marco actual, existen diferentes líneas de investigación que tienen mucho potencial, aunque la gran mayoría están aún en vías de desarrollo o no son del todo aplicables al mercado por el momento. El GDi (*Gasoline Direct Injection*) es una de las más importantes, y más que una línea de investigación, se ha consolidado ya como todo un sistema que supone un avance en los motores de gasolina, consiguiendo una mejora en las prestaciones y eficiencia del motor mediante la capacidad de inyectar gasolina directamente en el cilindro y una gran gestión del combustible y coordinación dependiendo del punto de operación. Este tipo de sistema, además, permite explorar procesos de combustión diluida, en los que no se trabaja con una mezcla puramente aire-combustible en relación estequiométrica, sino que se utilizan o bien dosados pobres (es decir, exceso de aire) o una cierta cantidad de gases recirculados (técnica conocida como EGR o *Exhaust Gas Recirculation*). Cualquiera de estos dos modos presenta ventajas en cuanto a la reducción de las pérdidas por estrangulación en bajas cargas, una de las grandes restricciones al rendimiento de los motores de encendido provocado. Además, la temperatura máxima de combustión se reduce, limitando tanto las emisiones de óxidos de nitrógeno como la posible aparición de combustión por autoencendido, lo que se puede aprovechar para incrementar la relación de compresión del motor. Sin embargo, existen retos en cuanto a la posibilidad de garantizar una combustión suficientemente rápida y estable en estas condiciones.

Otra tendencia muy relacionada con la anterior es la del GCI (*Gasoline Compression Ignition*) que permite el autoencendido sin necesidad de bujía en mezclas pobres con gasolina y sin la aparición de detonaciones descontroladas. Este concepto está lejos de madurar y tiene por delante muchas investigaciones para conseguir unos resultados favorables en el amplio rango de operación de un motor. Su punto débil es la complejidad que supone el control del instante de autoencendido exacto. Otras técnicas basadas en conceptos similares son el HCCI o HCSI (*Homogeneous Charge Compression Ignition* o *Homogeneous Charge Spark Ignition*). La principal diferencia de este último radica en que se utiliza la bujía para alcanzar un mayor control del punto de encendido de la mezcla.

Por último, dentro de todas estas tendencias también cabe mencionar que también se han explorado diversas vías en lo referente a los combustibles utilizados, mejorando su refinado o introduciendo compuestos que aporten ciertas características interesantes al combustible. Una línea de investigación surgida para paliar el problema de los contaminantes son los motores Dual-Fuel o los vehículos de combustible flexible (FFV: *Flexible Fuel Vehicle*) cuyo interés radica en que se pueden utilizar dos combustibles por separado o en conjunto, normalmente uno tradicional (Gasolina o Diésel) y otro alternativo (CNG, LPG...). Tiene también ventajas de cara al usuario dándole más versatilidad, pero se encuentra en fases de desarrollo.

Los retos para estas tendencias son múltiples y aunque la balanza en el marco actual se haya inclinado hacia los motores de gasolina debido a las emisiones, tanto éste como el motor diésel deben seguir mejorando para llegar a los objetivos deseados.

Con el mismo objetivo que estas líneas de investigación, se presenta la alternativa TJI (*Turbulent Jet Ignition*), objeto de estudio de este trabajo, y que reúne muchas de las características de las tendencias ya comentadas. Esta tecnología está ya presente en algunos coches de competición de élite como en la Fórmula 1, pero está en vías de estudio para su aplicabilidad en automóviles urbanos. Con esta alternativa se tiene una pre-cámara que actúa como sistema de encendido y combina una inyección directa en el cilindro (GDi) con la posibilidad de trabajar con mezclas muy pobres o diluidas con altas cantidades de EGR, obteniendo así menores emisiones con grandes prestaciones.

1.2 MOTIVACIÓN

Según investigadores de Oxford [15] estamos ya cerca del punto de no retorno, aproximadamente calculado para 2035, en el que ya no será evitable la catástrofe climática. Con la cada vez más creciente preocupación por el planeta y su estado, se hace más crucial encontrar soluciones a problemas primarios como lo es la emisión de contaminantes en los motores de combustión. Las previsiones apuntan a que para el año 2040 [12] aún se tendrá una dependencia global del 90% del petróleo en el transporte, aunque múltiples países como Gran Bretaña o Francia, ante la creciente presión social y contaminación de sus ciudades, planean prohibir los vehículos de dependencia fósil cuando ese año llegue.

El reemplazo de los combustibles fósiles tradicionales en los que se confía, como lo son los vehículos híbridos, los eléctricos o los de combustibles alternativos, aún están lejos de madurar y su aplicabilidad hoy en día se hace una tarea difícil, ya sea por su elevado coste, la falta de infraestructuras, una pobre eficiencia y autonomía...Por ello, y vista la realidad de que los motores de combustión aún no pueden ser dejados de lado, se debe seguir avanzando en la mejora cualitativa de estos motores para que cumplan con las normativas tan estrictas, y así poder frenar la creciente contaminación.

Pese a que existen muchas líneas de investigación como las enumeradas anteriormente, ninguna acaba de convencer y de momento no se han presentado como una solución viable. La motivación de este trabajo es el estudio de una alternativa que posea un gran potencial y una alta posibilidad

de aplicabilidad, que consiga un gran descenso de las emisiones contaminantes sin una gran pérdida de prestaciones. Es la tecnología TJI la que ha demostrado una gran capacidad de aplicabilidad con su uso en el sector del vehículo de competición, que junto con los recientes estudios realizados acerca de las pocas emisiones que genera, le otorgan a este sistema un gran potencial para la mejora de los MCIA.

1.3 OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DEL TRABAJO

El objetivo de este trabajo es entender la influencia de los cambios geométricos en la pre-cámara de la tecnología TJI, analizando el comportamiento general de la combustión.

Debido a los óptimos resultados obtenidos con esta tecnología en dosado fundamentalmente pobre, se seguirá esta tendencia que implica una emisión muy baja de NOx. A diferencia de estudios geométricos anteriores, aquí se observará el comportamiento del sistema con mezclas pobres mientras se varía el número de orificios y su localización espacial en la pre-cámara, pero siempre manteniendo la misma área total de orificios constante en cada caso. Se estudiará un total de cinco pre-cámaras con configuraciones geométricas distintas, manteniendo siempre las mismas condiciones de operación en cuanto a los dosados relativos de ambas cámaras y al punto de encendido. Se espera que un incremento del número de orificios sin variar el área total de paso, suponga una mejor propagación de la combustión tras la descarga, especialmente en mezclas muy pobres, pero un descenso en la velocidad y turbulencia de los chorros. Por otra parte, una de las pre-cámaras posee un orificio central, con el que se espera mejor las características de propagación en la zona cercana al pistón. Excepto la primera pre-cámara, todas poseen un desfase de 3 mm entre los ejes de los orificios enfrentados. Este hecho se espera que ayude a generar un movimiento de *swirl* dentro de la precámara durante el proceso de llenado, que además de beneficiar a la mezcla del combustible y el aire en la misma, ayude a una mayor distribución de los radicales precursores de la combustión esperando así una mejora en el inicio y desarrollo de este fenómeno.

Los procesos fundamentales que se llevarán a cabo en este estudio serán el estudio de las curvas de presión tanto de la pre-cámara como de la cámara principal, y el análisis de la penetración y velocidad de los chorros turbulentos a través de técnicas de visualización.

Para tal fin, se utilizará una RCEM (*Rapid Compression Expansion Machine*), una máquina que nos permitirá simular las condiciones deseadas en el cilindro durante las carreras de compresión y expansión y cuyo funcionamiento se detallará más adelante. Con esta máquina se realizará una serie de ensayos

utilizando isoootano como combustible sustitutivo de la gasolina para más tarde realizar el post-procesado de dichos ensayos con el fin de obtener información relevante acerca de éstos.

La estructura que seguirá este documento es la siguiente:

En primer lugar, se realizará una introducción de los conceptos teóricos más relevantes de los motores de gasolina en los que se basará el estudio, como el movimiento del aire en el cilindro, el tipo de combustión que se produce, así como apartados más específicos referentes al estudio de la curva de presión o las técnicas de visualización. A su vez, se introducirá el sistema TJI, explicando su concepto y lo que se conoce acerca de este concepto.

En el siguiente capítulo se describirá la instalación utilizada junto con los elementos que la componen, cómo funcionan y como interaccionan entre ellos. Además, se explicará la metodología llevada a cabo para la realización del estudio y la obtención de los resultados.

El último capítulo lo conforman los resultados obtenidos y el análisis de estos, obteniendo las conclusiones de este estudio. Para ello, se comparan las diversas geometrías de las pre-cámaras con una geometría estándar, analizando sus diferencias y observando cómo afecta este parámetro al fenómeno de la combustión.

Finalmente, se desarrollarán las conclusiones más importantes del trabajo y se propondrán algunas posibilidades de trabajos futuros planteadas tras el estudio.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

En este capítulo se van a exponer y explicar las ideas y conceptos teóricos más importantes de los motores de combustión interna alternativo de encendido provocado, pues el presente estudio de la tecnología TJI se ha centrado la interacción de este sistema con este tipo de motor.

ÍNDICE DEL APARTADO

2.1 MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVO	8
2.1.1 MOTOR DE ENCENDIDO PROVOCADO.....	10
2.1.3 MOVIMIENTO DEL AIRE EN EL CILINDRO	11
2.2 FENÓMENO DE LA COMBUSTIÓN	17
2.2.2 TIPOS DE COMBUSTIÓN	17
2.3 COMBUSTIÓN EN MEP	22
2.3.1 PROCESO DE LA COMBUSTIÓN.....	23
2.3.2 ESTUDIO GENERAL DE LA COMBUSTIÓN	24
2.3.3 CONTROL DE LA COMBUSTIÓN.....	26
2.3.4 KNOCK	27
2.3.5 SISTEMA DE INYECCIÓN.....	28
2.3.6 ANÁLISIS DE LA CURVA DE PRESIÓN DE UNA COMBUSTIÓN TÍPICA	31
2.4 TECNOLOGÍA TJI.....	35
2.4.1 TURBULENT JET IGNITION: GENERALIDADES	35
2.4.2 MODOS DE OPERACIÓN.....	37
2.4.3 PARÁMETROS RELEVANTES DE LA TECNOLOGÍA TJI	39
2.5 TÉCNICAS DE VISUALIZACIÓN	42

2.1 MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVO

El fundamento básico de un MCI es que el origen y desarrollo de la combustión sucede en el interior del cilindro del motor generando un movimiento alternativo a través de un pistón. Mediante este procedimiento se consigue transformar la energía liberada en la combustión, en energía mecánica. Al contrario que otro tipo de sistemas que queman ininterrumpidamente (turbina de gas, quemadores...), el motor funciona mediante un proceso cíclico de quemado, realizando repeticiones de la combustión en periodos muy cortos de tiempo. Es debido a esto que es necesario realizar el proceso denominado renovación de la carga, que consiste en expulsar los gases producto de la combustión e introducir mezcla fresca para el ciclo siguiente.

Los campos de aplicación de los MCI van desde una clara dominación siendo utilizados en vehículos de transporte terrestre y marítimo, pasando por avionetas, pequeños aviones privados, máquinas más pequeñas y herramientas motorizadas, hasta producción de energía eléctrica en ciclos combinados.

Los fundamentos del motor de combustión interna residen en las bases de la Termodinámica. Carnot, uno de los padres fundadores de esta rama de la física, estableció el ciclo termodinámico ideal de un motor clásico, a través del cual se define un límite máximo de la eficiencia que un motor puede alcanzar en la conversión de calor en trabajo.

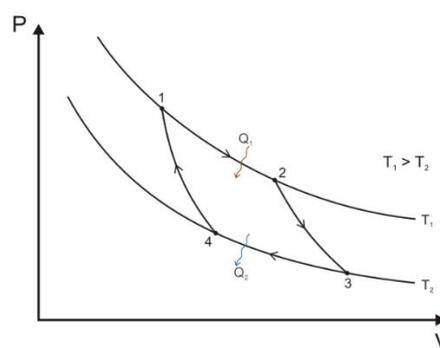


Figura 1. Ciclo ideal de Carnot.[17]

Otros ciclos termodinámicos que tienen una gran importancia en el mundo del motor son el ciclo de Otto y el ciclo Diésel. El ciclo Otto describe el proceso termodinámico por el cual se rigen los motores de encendido provocado o motores de gasolina, mientras que el ciclo Diésel lo hace para los motores de encendido por compresión o motores Diésel.

La principal diferencia termodinámica fundamental entre estos dos ciclos es que mientras en el ciclo Otto se da una combustión a volumen constante (isócara) en donde se absorbe calor y no se aporta trabajo, en el Ciclo Diésel ocurre una combustión a presión constante (isóbara) donde se absorbe calor mientras se realiza trabajo durante la carrera descendente del pistón.

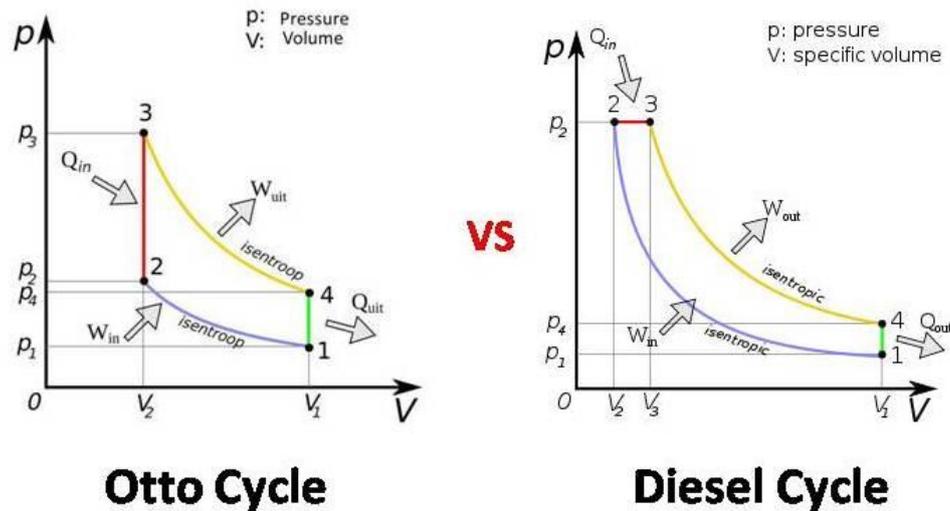


Figura 2. Diagrama P-V del Ciclo Otto y Ciclo Diésel.[10]

Existen muchas y muy diversas disposiciones constructivas, pero en cuanto a la disposición de los cilindros del motor, la forma más común es el motor en V o en línea, variando su número de cilindros en función de la potencia del motor.

Como puntos fuertes, el MCI es menos sensible a las variaciones de régimen y carga que otros motores térmicos y son capaces de abarcar un amplio abanico de potencias, lo que explica su utilización en múltiples aplicaciones. Por otro lado, es también versátil a la hora de la utilización de combustibles y sus grandes posibilidades de diseño constructivo suponen varias soluciones viables y útiles a diversos problemas o aplicaciones.

Sin embargo, el MCI presenta importantes debilidades como la emisión de contaminantes, la limitación en la potencia máxima y la gran dependencia del petróleo. Como se mencionó en el apartado [1.1], su clasificación es extensa y puede realizarse de varias maneras, pero cabe recordar que este trabajo se centrará en el motor de encendido provocado (MEP).

2.1.1 MOTOR DE ENCENDIDO PROVOCADO

La característica diferenciadora de este tipo de motor es que el inicio de la combustión se produce gracias a un aporte de energía inicial externo al ciclo termodinámico, realizado mediante un arco eléctrico creado entre los electrodos de una bujía. En cuanto a la mezcla aire combustible, en los MEP puede realizarse fuera del cilindro durante la admisión teniendo así un MEP de inyección indirecta, o bien puede introducirse únicamente aire en esta fase inicial y más tarde introducir el combustible en la compresión directamente en el cilindro (de inyección directa).

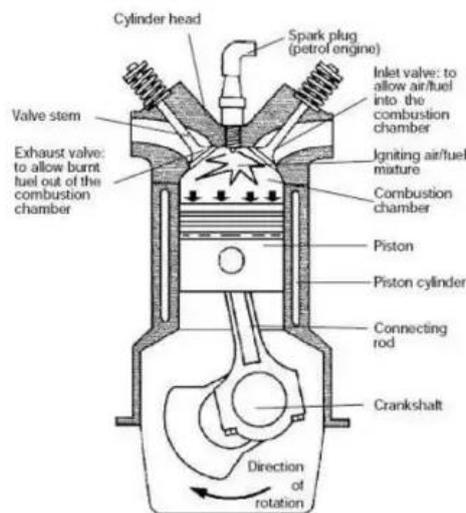


Figura 3. Esquema simplificado de un MEP[42]

A su vez, existe otra clasificación en base a los ciclos que realiza el motor para llevar a cabo el proceso de renovación de la carga por el cual se expulsan los gases quemados producto de la combustión y se realiza la entrada de mezcla fresca al cilindro. Se denominan motores de dos tiempos a aquellos que solo necesitan un ciclo (carrera completa de ascenso y descenso del pistón) para realizar el proceso, mientras que los de cuatro tiempos necesitan dos. Estos últimos son los más utilizados, mientras que los de dos tiempos quedan relevados a aplicaciones de bajo nivel. La máquina utilizada en este estudio (RCEM) realiza el proceso de renovación de la carga de una forma diferente a los motores anteriores, pero permitiendo una simulación fiel al MEP. Por tanto, en este estudio no será relevante distinguir entre motores de dos tiempos y motores de cuatro tiempos.

El proceso de combustión, que detallaremos más adelante, se caracteriza por un frente de llama que parte desde la bujía y avanza por toda la cámara de combustión, separando una zona de gases frescos de otra con gases quemados.

2.1.3 MOVIMIENTO DEL AIRE EN EL CILINDRO

A la hora de modelar y estudiar los fenómenos que suceden en el interior del cilindro, el movimiento que el aire realiza en éste cobra una gran importancia debido a que tiene una gran influencia en la mezcla del aire y el combustible por lo que su optimización es vital. Un correcto movimiento del aire permite una mezcla más homogénea con el combustible, generar turbulencia que beneficie la propagación de la llama y en los MEP en concreto, guiar la mezcla hacia el punto de encendido para que se produzca un buen inicio de la combustión.

Para poder controlar este movimiento primero debe estudiarse el flujo en sí mismo y las características que puede presentar. Las más importantes son:

- Flujo no estacionario: es decir, en constante variación. Esto es debido a la propia naturaleza del movimiento alternativo del pistón fundamentalmente. Cobra gran peso en los MEP.
- Flujo turbulento: por lo general, interesará tener una gran cantidad de turbulencia para favorecer la mezcla de aire - combustible.
- Flujo tridimensional: generalmente de carácter asimétrico
- Flujo bifásico: asociado a la transición del combustible de estado líquido a vapor.

Si bien con ciertas modificaciones en la geometría de ciertos elementos podemos influir en el movimiento del aire, no podemos evitar que la estructura del flujo varíe con cada ciclo. Es lo que se conoce como dispersión cíclica, y en los motores MEP tiene una gran importancia pues su efecto puede dar lugar a combustiones anómalas que penalicen en gran medida las emisiones contaminantes, sobre todo cuando el motor se encuentra en mezcla pobre. En la medida de lo posible debe intentar disminuirse el efecto de este fenómeno.

Hoy en día el modelado de los sistemas de combustión se realiza mediante cálculo CFD (*Computational Fluid Dynamics*) pues estos son capaces de ajustarse con gran precisión al comportamiento real del flujo, aunque siguen necesitando un modelo para la turbulencia que es obtenido experimentalmente.

Con el objetivo de poder controlar a libertad el movimiento del aire en el cilindro, y tras el estudio del flujo y el modelado, se modifican las geometrías de elementos como las pipas de admisión, las válvulas de admisión y la geometría del pistón, fundamentalmente. Mediante estas modificaciones se puede influir en gran medida al comportamiento del aire, que puede resumirse en tres movimientos fundamentales: *swirl*, *squish* y *tumble*.

SWIRL

Se trata de un movimiento de rotación alrededor del propio eje del cilindro. Este tipo de movimiento tiene su origen en el proceso de admisión y es originado por la geometría de las pipas de admisión, en su forma y dirección, haciendo que el flujo entre con un cierto momento angular que será el motor de este movimiento. Las funciones del *swirl* son distribuir el combustible en la cámara de combustión, mejorar el mezclado del aire con el combustible y reducir el efecto de pared por el cual la llama puede llegar a apagarse.

Tras entrar con un cierto momento angular, el valor del movimiento del *swirl* del aire estará controlado por el grado de disipación de éste mismo en el interior del cilindro, dependiendo de múltiples factores. Uno de ellos es inevitable y se trata de la fricción del aire con la pared. En la literatura se estima entre un 30 a un 50 por ciento del valor del momento angular. Otros factores son los efectos viscosos internos que se dan en el cilindro y el confinamiento del flujo en el interior del pistón si éste tiene una cavidad labrada (*bowl*). El *bowl* genera un movimiento de *squish* del que se hablará más adelante en este mismo apartado, pero este fenómeno combinado con el movimiento de *swirl* produce una penalización en el torbellino debido a una aceleración de la velocidad angular del vórtice por el confinamiento del flujo en la cavidad labrada.

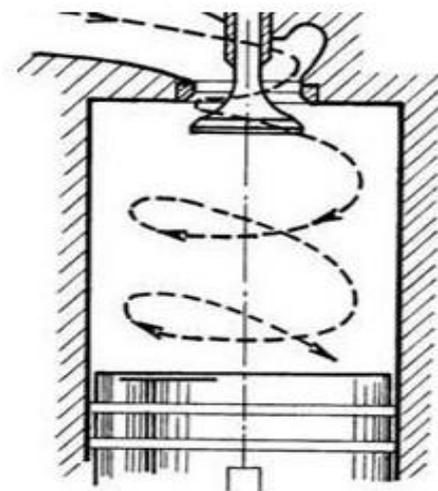


Figura 4. Movimiento de Swirl. [18]

Como se ha mencionado en el apartado anterior, la caracterización de la geometría de los elementos influyentes se realiza mediante cálculos CFD con el objetivo de parametrizar el movimiento. Se destacan, por tanto, dos parámetros fundamentales para el estudio del *swirl*, el CDM (Coeficiente de Descarga Medio) y CTM (Coeficiente de Torbellino Medio). Ambos dependen de la velocidad instantánea media del pistón y de su velocidad lineal media, pero el CDM en particular depende de otro parámetro conocido como coeficiente de descarga (C_D):

$$C_D = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_s} \quad (2.1)$$

Que se define como el cociente entre el gasto realmente trasegado \dot{m} y el gasto máximo que se podría trasegar en ausencia de pérdidas \dot{m}_s . Este parámetro determina la capacidad de llenado de la pipa.

Por otro lado, el CTM depende fundamentalmente del Coeficiente de Torbellino (C_T):

$$C_T = \frac{\omega_a}{\omega_M} \quad (2.2)$$

El C_T se define como el valor medio de la velocidad de rotación de la carga ω_a dividido por la velocidad de rotación ω_M que debería tener el motor para trasegar la misma masa que circula por la instalación durante el ensayo. Este parámetro controla la capacidad de generación del *swirl*.

A continuación, se muestran las expresiones que permiten calcular los parámetros comentados: CDM y CTM

$$CDM = \left[\frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{1}{C_D(\alpha)^2} \left[\frac{C_\alpha}{C_m} \right]^3 d\alpha \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

$$CTM = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi C_T(\alpha) \left[\frac{C_\alpha}{C_m} \right]^2 d\alpha \quad (2.4)$$

Donde:

C_D : coeficiente de descarga.

C_T : coeficiente de torbellino.

C_α : velocidad instantánea del pistón en el punto angular α .

C_m : velocidad lineal media del pistón.

Sendos coeficientes pueden ser obtenidos experimentalmente o mediante simulación CFD (*Computational Fluid Dynamics*), aunque se suele complementar con técnicas de anemometría que permiten conocer la velocidad en el punto de medida en sus tres componentes como la anemometría de hilo caliente, las técnicas con láser Doppler o la velocimetría de imágenes de partículas. Si se realizan los suficientes puntos de medida, se puede llegar a determinar el campo de velocidad al completo.

Una vez se tienen los valores de los parámetros, se puede empezar a discutir la geometría de los distintos elementos influyentes en el *swirl*. En la literatura se menciona, en cuanto al diseño de las pipas de admisión, que el óptimo sería aquel con cuatro válvulas por cilindro (2 de admisión y 2 de escape) porque permiten un mayor control del *swirl*. En cuanto a su geometría, si las pipas son helicoidales se consigue un gran momento angular que genera un potente torbellino a levantamientos medios y bajos de las válvulas. A priori, puede pensarse como algo positivo, pero si el suceso es excesivo, dificultará el desarrollo de la combustión. Por otro lado, si son pipas que dirigen el aire hacia las paredes del cilindro (direccionales) se produce un mayor arrollamiento del torbellino a levantamientos bajos de válvula.

SQUISH

Se define como *squish* al movimiento del flujo hacia el centro del cilindro producido por una geometría especial del pistón denominada *bowl*. Esta geometría consiste en una cavidad labrada en la propia cabeza del pistón que hace que el flujo se confine en el interior de esta cavidad. De los tres movimientos, es el único que en lugar de disiparse en la carrera de compresión, va aumentando su valor.

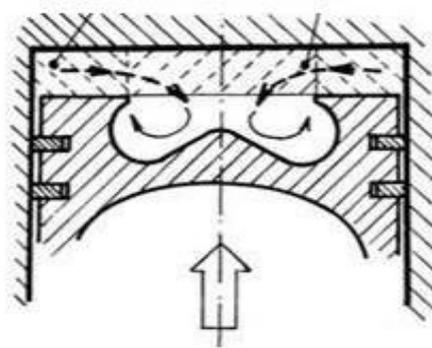


Figura 5. Movimiento de *squish*. [18]

La intensidad con la que el fluido penetra radialmente desde la periferia hacia el eje está fuertemente influenciada por el *swirl*. Cabe mencionar que el *squish* no se utiliza individualmente si no como complemento a otros movimientos. Así, la combinación más frecuente es combinar un movimiento de *swirl* con *squish*. Con esta combinación se consigue disminuir el radio de giro del *swirl* aumentando su velocidad de rotación y, por tanto, de forma directa, acelerando el *swirl* sobre todo en el último tercio de la carrera de compresión cuando el *squish* cobra más importancia, al generar estructuras verticales que modifican el transporte convectivo y favoreciendo un movimiento turbulento del flujo.

No obstante, cuanto mayor es el swirl, menor es la capacidad de penetración del fluido (*squish*) por lo que hay que asegurar un buen compromiso para llegar a la distribución de la mezcla deseada. La forma resultante de la combinación de ambos fenómenos es similar a un toroide distorsionado de forma radial.

La geometría del *bowl* tiene una gran importancia y por ello existen múltiples diseños en función de lo que se quiera lograr. Puesto que los ensayos para el estudio de la tecnología TJI han sido realizados con un pistón plano, no entraremos en demasiado detalle en este apartado, pero sí cabe mencionar que, a rasgos generales, se observa que a mayor diámetro y una menor inclinación de las paredes, menor es el movimiento de *squish* y su interacción con el *swirl*. En la siguiente figura se puede observar cómo afecta la inclinación de las paredes en parámetros como el *swirl* o la generación de NOx y hollín.

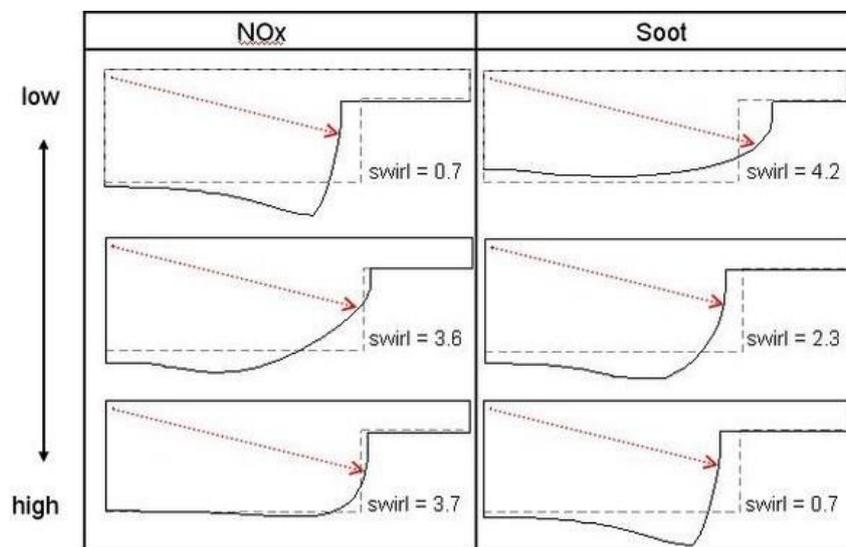


Figura 6. Diferentes geometrías del *bowl* y su efecto sobre parámetros como el *swirl*, el hollín y el NOx.[16]

TUMBLE

El último movimiento fundamental que se va a explicar es el llamado *tumble* y consiste en un movimiento de rotación del aire alrededor de un eje perpendicular al eje del cilindro. Se origina durante la admisión y es mayormente utilizado en los motores MEP de 4T pues el torbellino generado aumenta la turbulencia del flujo próximo a la bujía lo que favorece un encendido óptimo.

Para conseguir un buen *tumble* se debe asegurar que el torbellino persista tras la carrera de compresión y un parámetro importante para conseguir esto es la inclinación de las pipas de admisión. Si las pipas tienen una inclinación pequeña, el sentido de giro generado será contrario a las agujas del reloj. En cambio, si la inclinación de las pipas es mucho mayor, se consigue un sentido horario. El hecho de decantarse por una de estas dos opciones dependerá de factores como la localización de la bujía y su orientación.

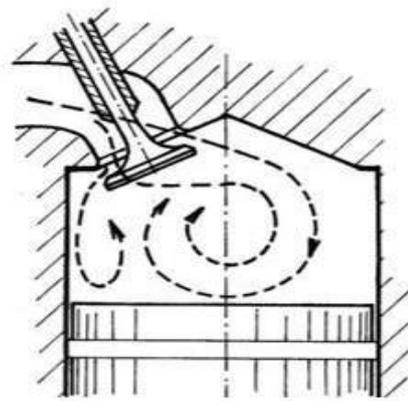


Figura 7. Movimiento de Tumble. [18]

Como en el caso del *swirl*, la fuente de generación del *tumble* finaliza en etapas tempranas, al finalizar la admisión, por ello debe generarse una intensidad del torbellino suficiente como para que este se mantenga en el tiempo. Sin embargo, un exceso en la intensidad podría provocar un apagado de llama o impedir el encendido de la mezcla.

En conclusión, estos tres movimientos fundamentales deben coordinarse de manera adecuada para producir una mejora en las condiciones de inicio y desarrollo de la combustión, para así obtener el máximo trabajo posible de la misma.

2.2 FENÓMENO DE LA COMBUSTIÓN

Existen múltiples definiciones del fenómeno de la combustión, pero en este contexto de estudio, se entiende por combustión al proceso de transformación de la energía almacenada en los enlaces químicos de unos determinados compuestos en calor a través de un proceso de oxidación. Así, en el ámbito de los MCI, ocurre una transformación de energía química almacenada en el combustible en energía térmica generada en el interior del cilindro, que posteriormente se transformará en energía mecánica mediante el mecanismo biela-manivela. Es gracias a este fenómeno que se obtiene en última instancia, trabajo o energía útil.

En el desarrollo de la combustión en los MCI tanto los fenómenos químicos como los físicos de la combustión tienen gran importancia, pues en ciertos procesos la combustión está controlada por los tiempos de los mecanismos químicos y en otros son los aspectos físicos los más lentos, por lo que son fenómenos de convección y difusión los que dictan los tiempos característicos del proceso. Generalmente se intentará reducir al máximo el tiempo de la combustión sin perder capacidad de generar trabajo, obteniendo así más potencia.

2.2.2 TIPOS DE COMBUSTIÓN

Existen fundamentalmente dos tipos de combustión:

Combustión generalizada: el inicio del fenómeno no está provocado por un agente exterior, por lo que no se puede predecir el punto de encendido, no siendo así con el instante de encendido.

Combustión localizada: ocasionada por un agente externo, se genera un frente de llama que se propaga con una cierta velocidad. En función del valor de esta velocidad, se distingue entre:

- Detonación: Cuando la velocidad de propagación es igual o superior a la velocidad del sonido. Se genera una discontinuidad en la presión del sistema.
- Deflagración: la velocidad del frente de llama es inferior a la velocidad del sonido, es lo que comúnmente se conoce como llama. Se trata de una combustión con un carácter menos explosivo en el que se produce una discontinuidad en la temperatura. Se profundizará un poco más en este tipo de combustión pues es la que se produce en los motores de combustión interna, pudiendo distinguirse dos tipos fundamentales:

- Deflagración por difusión: el combustible y el agente oxidante se encuentran inicialmente separados o incluso en estados de agregación distintos. La combustión se desarrolla a medida que se va produciendo la mezcla (heterogénea) de los reactivos. La tasa de mezcla es muy importante, pues es la que controla la liberación de calor. Sin embargo, en ciertas aplicaciones es la tasa de evaporación la más crucial pues es más lenta que la tasa de mezcla. Este tipo de combustión es típica de quemadores de combustibles líquidos, turbinas de gas y los motores de encendido por compresión (MEC).
- Deflagración premezclada: el combustible y el aire se encuentran previamente mezclados, conformando una mezcla homogénea. Al contrario que en el caso anterior, los procesos de mezcla y combustión están separados en el tiempo. Existen ciertos matices, pues si se trabaja con carga estratificada, se estaría estudiando una combustión premezclada no homogénea. Este tipo de combustión se da en los quemadores de gas y en los motores de encendido provocado (MEP), objeto de interés del presente trabajo, por lo que se seguirá desarrollando este tipo de combustión. Existen dos tipos: premezclada laminar y turbulenta.

2.2.2.1 COMBUSTIÓN PREMEZCLADA LAMINAR

La combustión premezclada laminar tiene una estructura ordenada y posee bajos números de Reynolds en contraposición a la combustión premezclada turbulenta. En el caso laminar, para explicar el proceso de la combustión se suelen distinguir tres zonas temporales denominadas: zona de precalentamiento, zona de reacción y zona de recombinación. En la primera de estas zonas ocurren reacciones previas a la combustión que no son relevantes desde el punto de vista energético, generándose sustancias puente. La aparición de los productos finales y la liberación de calor ocurren en la zona de reacción, donde fundamentalmente se produce la combustión. Por último, en la zona de recombinación se producen reacciones entre los productos carentes de importancia energética, pero la temperatura sigue siendo elevada tras la fase de reacción.

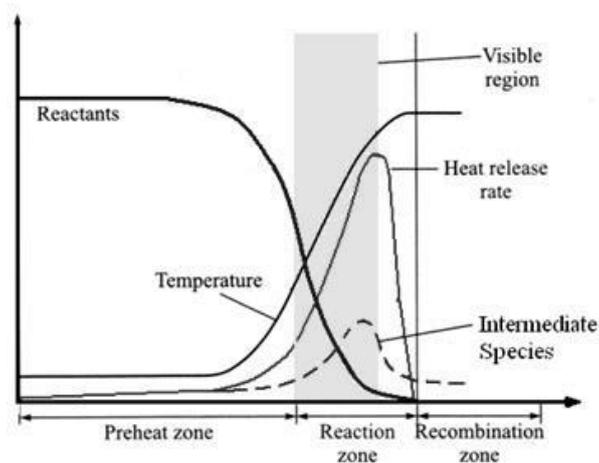


Figura 8. Zonas del proceso de combustión premezclada laminar.[11]

Puesto que normalmente en los motores se requerirán de tiempos de la combustión muy pequeños y grandes turbulencias, este tipo de llama puede parecer carente de interés, pero es a partir del estudio de la combustión laminar desde donde se aborda el estudio de la combustión turbulenta que tiene mayor relevancia en el ámbito del motor.

Es necesario introducir ahora el concepto de velocidad de la llama laminar, que surge tras haber aceptado ciertas hipótesis recogidas en la teoría híbrida de Zeldovich, Frank-Kamenetski y Semenov, como que se trata de un flujo unidimensional estacionario, la energía cinética y potencial son despreciables, la radiación térmica es despreciable etc. A continuación, se muestra la expresión final de la velocidad de la llama laminar bajo este marco teórico:

$$U_{CL} = \sqrt{\alpha \omega T_{sq}^2 p^{n-2}} \quad (2.5)$$

Donde:

α : coeficiente de difusividad térmica.

ω : velocidad de reacción del combustible por unidad de volumen.

T_{sq} : temperatura de la mezcla sin quemar.

p : presión.

n : orden de reacción.

Lo primero que se puede observar es que la velocidad U_{CL} depende de factores tanto químicos como físicos, por lo que ambos mecanismos tendrán importancia en este parámetro. Así pues, esta velocidad entre otros factores depende del tipo de combustible, la cantidad de inertes, el dosado y las condiciones termodinámicas. Una velocidad típica de un motor MEP suele estar comprendida entre los 0,1 - 1 m/s. Seguidamente se puede calcular el espesor del frente de llama δ con algunas hipótesis adicionales:

$$\delta = \frac{\alpha}{U_{CL}} \quad (2.6)$$

Este espesor de llama suele ser del orden de 1 mm en un MEP.

2.2.2.2 COMBUSTIÓN PREMEZCLADA TURBULENTA

Las llamas turbulentas están presentes en casi todos los procesos prácticos de la combustión, pues son más eficientes y conllevan velocidades mayores que en el caso laminar. Sin embargo, el estudio de la estructura de este tipo de llamas es muy complejo y no se comprenden al completo todos los fenómenos físico-químicos que suceden. Las características generales que suelen tener estos tipos de flujo son una tridimensionalidad clara, irregularidades y fluctuaciones, eventuales generaciones de vórtices, alta difusividad (lo que implica más transporte de masa y energía) y alta disipación de energía.

Para cuantificar la turbulencia se puede utilizar el concepto de intensidad de turbulencia, que se define a partir de la desviación típica de la velocidad.

$$I = \sqrt{\frac{\sum(u(t) - \bar{u})^2}{n}} \quad (2.7)$$

Donde:

I: intensidad de la turbulencia.

$u(t)$: velocidad del fluido en el instante t.

\bar{u} : velocidad media del flujo.

n: número de muestras.

Como era de esperar, si aumenta la velocidad y, por tanto, si aumenta el número de Reynolds, mayor es la intensidad de la turbulencia.

Por otra parte, hay que distinguir entre dos tipos de llamas premezcladas turbulentas que dependen de la interacción entre un frente de llama laminar y un campo de flujo turbulento.

Las primeras a mencionar son las llamas plisadas o arrugadas en las que la intensidad de la turbulencia es pequeña y la escala espacial es grande comparada con el espesor del frente de llama. Este tipo de llamas presenta torbellinos muy grandes, más que el propio frente de llama. Este último separa claramente la zona de reactivos y productos. En esta combustión se produce un aumento en la superficie efectiva del frente de llama debida a la deformación de la llama, lo que supone un incremento en los fenómenos de transporte. La siguiente expresión permite determinar la velocidad de este tipo de llama en relación al caso laminar:

$$\frac{u_{CT}}{u_{CL}} = \frac{A_{ef}}{A} \approx Re \quad (2.8)$$

Donde:

u_{CT} : velocidad de la llama turbulenta (plisada).

u_{CL} : velocidad de la llama laminar.

A_{ef} : sección efectiva en el intercambio de masa y energía.

A : sección geométrica suponiendo una llama sin deformaciones.

Las llamas distribuidas son otro tipo de llamas turbulentas en las que la intensidad de la turbulencia es elevada y la escala espacial es pequeña, comparable al espesor del frente de llama. En este caso la forma de la llama no se deforma respecto al caso laminar, pero su velocidad sigue siendo superior. Al contrario que en el caso anterior, tiene torbellinos más pequeños que no afectan al frente de llama. Para el cálculo de la velocidad en este tipo de llamas también se emplea la relación con el caso laminar:

$$\frac{u_{CT}}{u_{CL}} = \sqrt{\frac{\mu_T}{\mu}} \approx \sqrt{Re} \quad (2.9)$$

Donde:

μ : viscosidad en el caso turbulento

μ : viscosidad molecular

De manera general, todas las expresiones que relacionan la velocidad turbulenta de la llama con la laminar, explican que para llamas plisadas hay una correlación lineal con el número de Reynolds, sin embargo, para llamas distribuidas hay una relación cuadrática con este número.

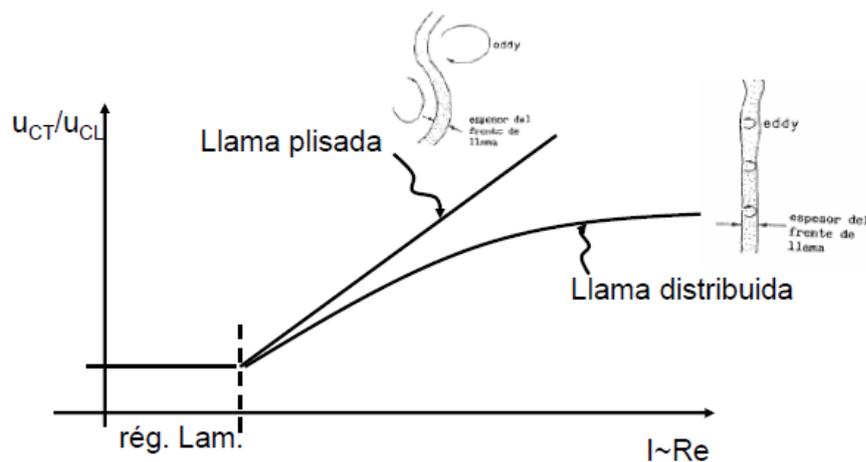


Figura 9. Relación entre Reynolds y las llamas plisadas y distribuidas.[3]

2.3 COMBUSTIÓN EN MEP

La combustión de la mezcla en el interior del cilindro de un motor de encendido provocado es uno de los fenómenos con más peso a la hora de hablar de potencia, rendimiento o emisiones. Si bien la inyección directa en este tipo de motores cada vez está más presente, en el motor MEP tradicional se tiene una inyección indirecta que supone una combustión de tipo deflagración premezclada con carga homogénea.

2.3.1 PROCESO DE LA COMBUSTIÓN

El proceso de la combustión normal en un motor MEP se inicia tras la chispa eléctrica de la bujía. Cabe aclarar que uno de los requisitos del combustible es que tenga una gran resistencia a la auto-inflamación pues de no ser así la combustión podría adelantarse a la chispa con el aumento de la presión a causa de la carrera de compresión. Así mismo, también debe tener una elevada volatilidad para favorecer una mezcla homogénea.

En una primera fase de la combustión, el volumen de gases quemados es pequeño y se va propagando poco a poco mediante una combustión laminar hacia el resto de la mezcla, con lo que el aumento de la presión es pequeño, pero superado el valor de la presión de compresión, la mezcla quemándose engloba más volumen con lo que empieza a subir la presión, dando comienzo a la segunda fase de la combustión. Esta última es mucho más rápida debido al aumento en temperatura, velocidad de combustión, superficie del frente de llama...con lo que en esta fase se produce el aumento sensible en la presión característica en la combustión dentro de un cilindro. La fase finaliza cuando el frente de llama se aproxima a las paredes del cilindro, ralentizándose. En la tercera y última fase, el proceso de la combustión termina de desarrollarse por completo quemando las zonas que aún no se habían oxidado.

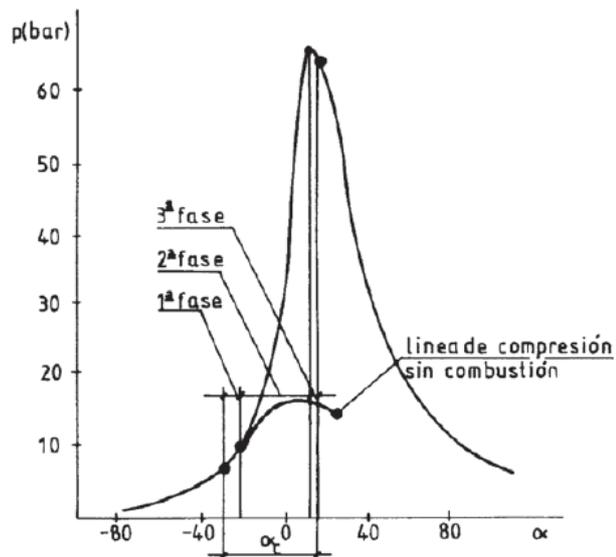


Figura 10. Estudio de la presión en un ensayo de combustión y un ensayo sin combustión.[4]

2.3.2 ESTUDIO GENERAL DE LA COMBUSTIÓN

A la hora de su estudio, los parámetros que pueden proporcionar mucha información son los valores de presión y temperatura, pero esta última no es de fácil medición pues se trata de un entorno con irregularidades importantes en la temperatura y los cambios de ésta ocurren en periodos de tiempo demasiado pequeños. Sin embargo, la medida de la presión es interesante pues en esta aplicación puede considerarse más o menos uniforme y el proceso es mucho más lento, utilizando captadores piezoeléctricos para su medida.

El método general de estudio del proceso de la combustión empieza por tanto con la medida experimental de la presión, a lo que le sigue el planteamiento de la ley de conservación de la energía con el objetivo de obtener la cantidad de calor aparente que se libera en la combustión. Si se consiguen estimar las pérdidas de calor por las paredes y el poder calorífico del combustible, se puede llegar a conocer la masa de combustible que se quema en cada instante.

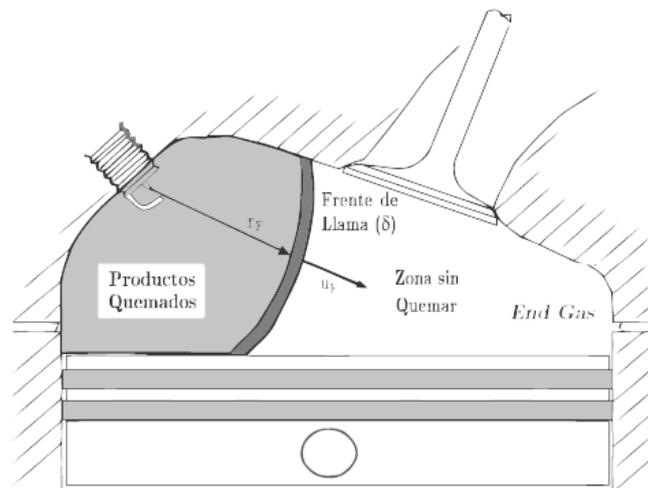


Figura 11. Fase intermedia de la combustión en el cilindro de un MEP.[1]

Como se puede observar en la figura anterior, el frente de llama de espesor δ separa claramente la zona de los productos quemados de la de la mezcla que aún no ha llegado a quemarse, y se propaga por toda la cámara de combustión. Tras la energía de activación, es decir, la chispa de la bujía, la combustión se produce y se genera un frente de llama, dando lugar a un aumento de la presión mucho mayor comparado con un movimiento de compresión del pistón sin combustión, conocido como arrastre. Siguiendo el método explicado anteriormente, se determina esta presión y a partir de esta información se obtiene la cantidad de calor liberado (QL). Con el dato del poder calorífico del combustible es fácil determinar la masa a partir del calor liberado. Esta información se suele presentar en relación a la masa o el calor total liberados, obteniendo una fracción de masa quemada (FMQ) o fracción de calor liberado (FQL), si bien también puede utilizarse la derivada temporal (o angular) para presentar la evolución de estos parámetros a lo largo del proceso (dFMQ o dFQL).

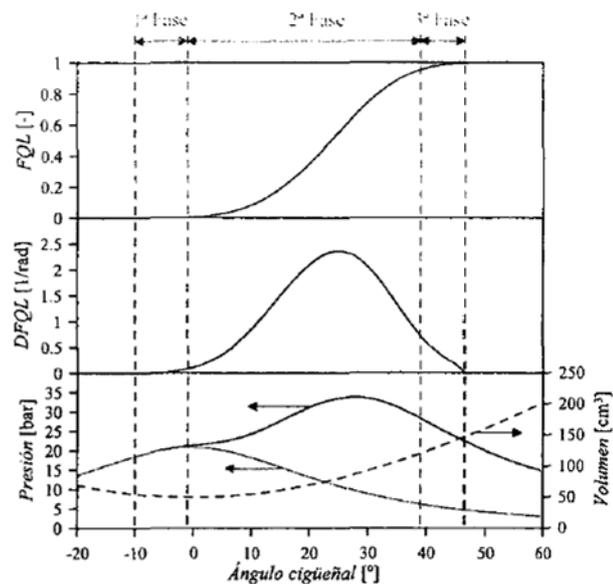


Figura 12. Desarrollo de presión, dFQL y FQL con el ángulo del cigüeñal.[1]

Centrándonos en el parámetro de la velocidad, este parámetro crece a medida que la presión y temperatura aumentan en el interior de la cámara de combustión. Cabe mencionar que se trabaja en régimen turbulento por lo que las velocidades son elevadas, cuantificándose su valor a través el denominado *Flame Speed Ratio* que, como vimos en el apartado anterior, relaciona mediante un cociente la velocidad de la llama turbulenta con la llama laminar. Una gran velocidad y turbulencia dentro de la cámara de combustión suponen una combustión mucho más rápida y la capacidad de transmitir de forma más rápida la energía de la mezcla ya quemada. Estos dos parámetros aumentan a medida que aumenta el régimen de giro, permitiendo a los motores MEP trabajar a altos regímenes.

2.3.3 CONTROL DE LA COMBUSTIÓN

Hay ciertos parámetros en un MEP que son susceptibles de ser controlados para influir en mayor o menor medida al proceso de la combustión. Estos factores son múltiples y pueden ser tanto de diseño como de funcionamiento.

Uno de los más importantes que afecta de manera directa en este proceso es el control del punto de encendido. La variación de este instante tiene un gran impacto en el trabajo desarrollado por el ciclo. Al ir avanzando el instante de encendido aumenta la cantidad de masa quemada antes del punto muerto superior, lo que provoca un aumento de la presión y temperatura máximas. Sin embargo, también se producirá un crecimiento prematuro de la transferencia de calor a las paredes lo que se traducirá en menor presión y temperatura. Un aumento excesivo en el avance aumenta el riesgo de sufrir una combustión potencialmente destructiva (*knock*) de la que se hablará más adelante. Hoy en día se realiza un control activo del punto de encendido, es decir, este varía en función del régimen de giro y la carga. Así, el avance en el punto de encendido debe aumentarse al disminuir la carga y al aumentar el régimen de giro.

En cuanto a factores de diseño, se mencionan la posición de la bujía y los diseños de la cámara de combustión. Estos dos elementos deben coordinarse de tal forma que maximicen la obtención de trabajo, aumentando la turbulencia. La cámara de combustión tiene que ser de pequeñas dimensiones para no perder demasiado calor liberado a través de las paredes. Actualmente existen infinidad de diseños muy diferentes pero efectivos. La posición de la bujía debe ser centrada en el punto más caliente y que permita un recorrido mínimo del frente de llama. Existen configuraciones donde se utiliza más de una bujía para realizar el encendido de la mezcla.

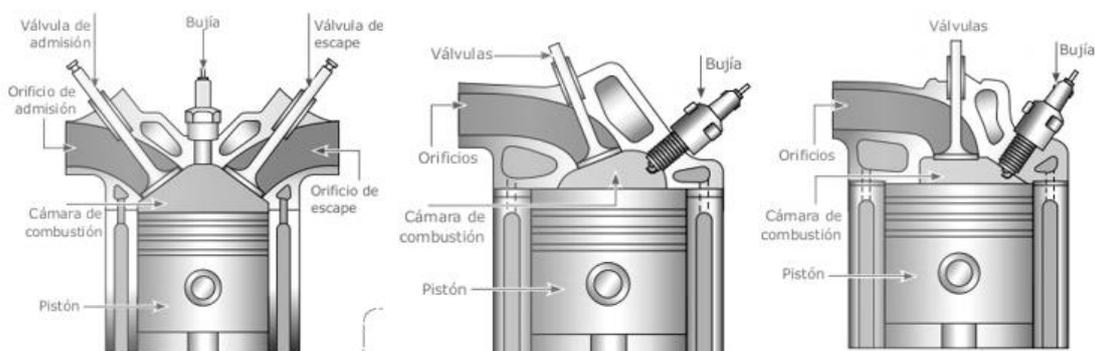


Figura 13. Distintos diseños de la cámara de combustión y posición de la bujía. [36]

Uno de los factores más importante a controlar es la cantidad de mezcla, es decir, el dosado. En los motores MEP se realiza un control cuantitativo, o lo que es lo mismo, se actúa sobre la cantidad de la mezcla que entra en el cilindro, normalmente mediante la válvula de mariposa. Hoy en día existen muchos diseños en cuanto al mapa del dosado en un motor.

El control del dosado tiene una gran importancia en las emisiones del motor. Si se utiliza un catalizador es necesario que el dosado relativo (Fr) sea igual a uno. Si se buscan prestaciones, lo idóneo es trabajar con dosados superiores al estequiométrico en altas cargas, lo que supondrá un consumo elevado y por tanto altas emisiones. Por el contrario, si se busca un bajo consumo se deben utilizar dosados pobres a bajas cargas.

Todas estas posibilidades dificultan las técnicas de postratamiento a aplicar en el motor. En cuanto a su relación con el rendimiento, hay que tener en cuenta que cuanto más estrangulamiento produzca la válvula, más pérdidas mecánicas supondrá, disminuyendo por tanto el rendimiento. Cuanto más abierta esté la válvula, mayor rendimiento se conseguirá a igualdad de condiciones. Cabe mencionar que el control de la combustión no puede ser absoluto debido a la dispersión cíclica del motor, variaciones locales de factores como turbulencia, dosado...

2.3.4 KNOCK

La expansión de los gases quemados en el volumen cerrado implica que las zonas donde aún no se ha oxidado la mezcla se encuentren a gran presión pues están siendo comprimidas por los gases en expansión. A medida que se van expandiendo van generando más y más presión en estas zonas, generándose en la última zona sin quemar grandes presiones que podrían ser peligrosas si no se controlan. Esta zona se denomina zona de *End Gas* y suele encontrarse en el rincón más alejado de la bujía.

Si la presión y temperatura de la región denominada *End Gas* supera ciertos valores críticos, se produce un autoencendido de la mezcla sin quemar que genera otro frente de llama distinto, normalmente de sentido opuesto al anterior, que genera grandes gradientes de presión y un efecto de autoencendido en todo el flujo que genera grandes cantidades de energía. Este fenómeno se conoce como *knock* o picado, y produce efectos dañinos para el motor, sometiendo a grandes esfuerzos a los materiales del cilindro. Por otro lado, este fenómeno puede llegar a romper la capa límite térmica, que constituye una de las defensas térmicas más importantes del cilindro. Para prevenir su aparición, pueden realizarse acciones como la limitación de la relación de compresión y la limitación del avance del punto de encendido.

En el apartado 2.3.6 se puede observar la curva de presión correspondiente al fenómeno de *knock*.

2.3.5 SISTEMA DE INYECCIÓN

Una correcta mezcla y un dosado adecuado, como se ha mencionado en el apartado anterior, son muy importantes para el desarrollo de la combustión. A la hora de controlar estos parámetros, el sistema de inyección y su correcto funcionamiento tienen una gran importancia en este contexto.

El carburador fue el primer sistema de inyección propiamente dicho en cuanto a motores MEP se refiere, pero ha sido sustituido por sistemas de inyección más modernos que han probado ser más eficientes y versátiles. Estos están controlados mediante electrónica, permitiendo tamaños más reducidos, presiones de inyección mayores, orificios más pequeños, un control más preciso de los tiempos...

Asimismo, son capaces de generar una atomización muy eficiente que genera una mezcla mucho más homogénea, aumentando la eficiencia. Permiten también un control más exhaustivo del gasto en función del grado de carga y régimen de giro del motor, lo que supone un gran impacto en la reducción de emisiones contaminantes. Tradicionalmente los sistemas de inyección en los motores MEP han sido de inyección indirecta, pero hoy en día la inyección directa está cobrando una gran presencia.

La inyección indirecta consiste en la introducción del combustible en el exterior del cilindro, consiguiendo una mezcla del aire y el combustible previa a llegar a la cámara de combustión. Esta opción permite una mezcla más homogénea antes de la combustión y unas condiciones físicas más amigables para los materiales del inyector. Por otro lado, en la inyección directa el combustible se inyecta directamente en el interior del cilindro. Esta opción es más exigente con el inyector pero permite la opción de trabajar con mezclas estratificadas en ciertos grados de carga que permiten ahorrar un poco de combustible.

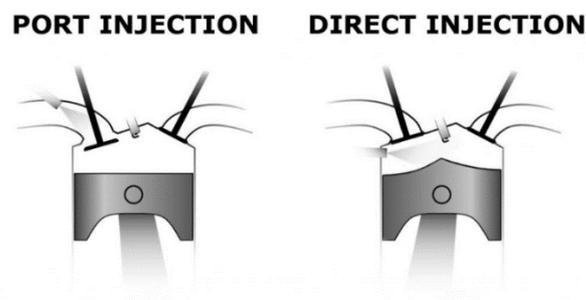


Figura 14. Inyección indirecta e inyección directa.[43]

Por otro lado, los sistemas de inyección pueden ser de tipo monopunto o multipunto. La primera alternativa es la más sencilla, pues consiste simplemente en utilizar un único inyector para todos los cilindros. A pesar de ser sencilla, supone una opción poco eficiente si se quiere controlar con precisión la cantidad de combustible que entra en cada cilindro. Por otro lado, la inyección multipunto consiste en utilizar un inyector por cada cilindro. Es una opción más cara y compleja pero permite un control preciso en la mezcla de cada cilindro.

En cuanto a los elementos que componen el sistema de inyección, estos pueden variar dependiendo del tipo de sistema, pero generalmente se encontrará una o dos bombas de combustible para impulsar a éste a través del sistema, un filtro que proteja a los inyectores y cilindros de las impurezas, los conductos de alimentación, distintos sensores de presión del combustible, reguladores de presión e inyectores.

El esquema de un sistema multipunto utilizado en los motores de gasolina tiene un gran parecido con el sistema *Common Rail* típicamente utilizado en los motores diésel, que pretende llegar a niveles de pulverización mucho mayores a través de orificios más pequeños y mayores presiones.

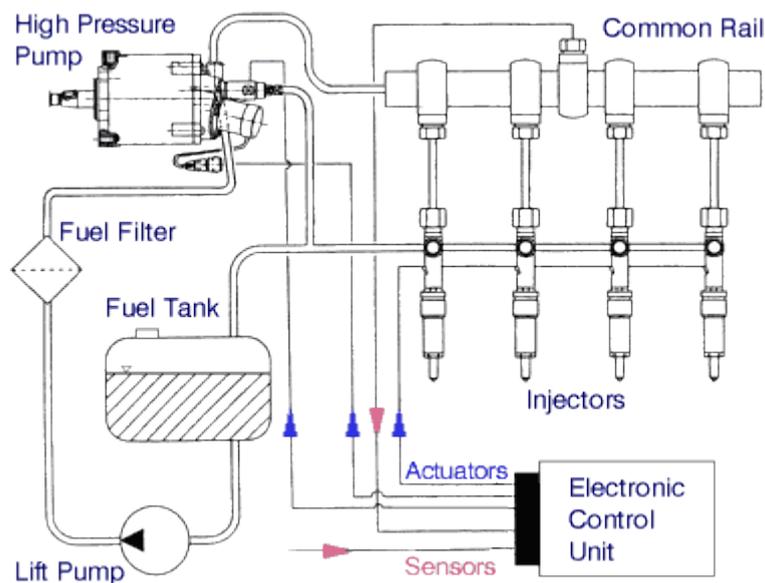


Figura 15. Esquema básico del Common Rail.[37]

La base del funcionamiento del inyector se basa en un equilibrio de presiones. La presión proporcionada por la bomba y que transmite al combustible llega a la aguja del inyector y en estado de reposo, mantiene el orificio cerrado. Pero al activarse el solenoide se vacía el volumen de control del combustible perdiendo así presión. Así, la presión al otro lado de la aguja es mayor lo que provoca el levantamiento de ésta, dejando paso al combustible para que salga a través del orificio. Al desactivarse el solenoide, la presión vuelve al volumen de control y la aguja desciende, y se cierra el orificio de inyección.

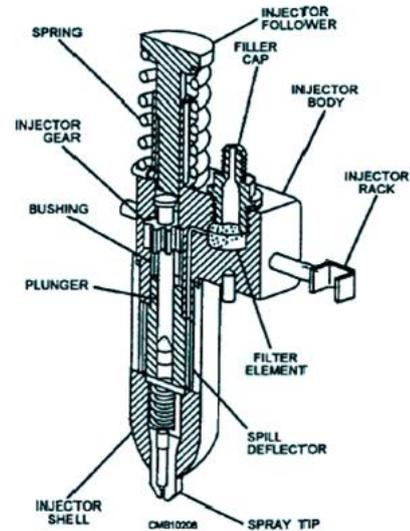


Figura 16. [44]

Por otro lado, es muy importante la medida precisa de la cantidad de combustible a inyectar en el cilindro. Para realizar esta acción se utiliza un tasímetro que pondrá a prueba el inyector simulando las condiciones de funcionamiento deseadas. Así, se mide la variación de presión que produce la onda generada al producirse la inyección. A partir de la diferencia de presión medida, se puede conocer el caudal másico mediante la expresión:

$$m = \frac{A}{a} \Delta p \quad (2.10)$$

Donde:

A es la sección del tubo, a es la velocidad del sonido en las condiciones en las que se encuentra el combustible y Δp es la diferencia de presiones.

Como se verá más adelante, para alcanzar el dosado relativo requerido es necesario realizar más de una inyección. Esto es debido al llamado *energizing time*, tiempo de energía de activación de la bobina del inyector. Este tiempo tiene un límite máximo que si se supera, puede llegar a quemar la bobina. Para el cálculo de este parámetro se utiliza una fórmula generalmente de dependencia lineal, y si el valor obtenido de *energizing time* supera el límite máximo, la inyección deberá dividirse.

2.3.6 ANÁLISIS DE LA CURVA DE PRESIÓN DE UNA COMBUSTIÓN TÍPICA

Para poder entender más adelante los resultados obtenidos en lo referente a la presión en la combustión, se explicarán en este apartado los fundamentos básicos del estudio del desarrollo de la presión en una combustión de un motor de gasolina convencional.

Se introduce aquí el concepto de arrastre, que no es más que un ciclo convencional, pero sin un fenómeno de combustión. Por tanto, en un arrastre simplemente tenemos una fase de compresión y una fase de expansión. Estas dos fases se ven claramente representadas en la siguiente figura:

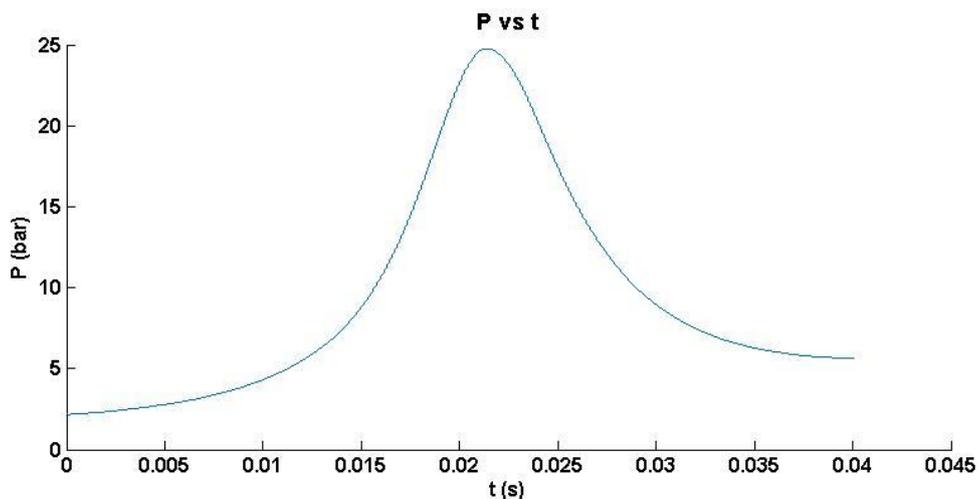


Figura 17. Gráfica de presión frente al tiempo en un ciclo sin combustión.

Como es lógico, se produce un incremento progresivo de la presión a medida que el pistón va ascendiendo hasta el PMS. Es en este punto cuando se alcanza el valor máximo de presión, y a partir de ahí, con el descenso del pistón la presión va cayendo progresivamente. Los valores de presión de pico dependen fundamentalmente de la relación de compresión que se alcance y de la presión de admisión.

Generalmente, se cumple que la presión de pico es:

$$p_{max} = p_0 RC^n \quad (2.11)$$

Donde:

p_{max} : valor de la presión de pico.

p_0 : valor de la presión de admisión.

RC: relación de compresión.

n: exponente politrópico.

La curva de presión correspondiente a un ciclo con combustión se muestra en la siguiente figura:

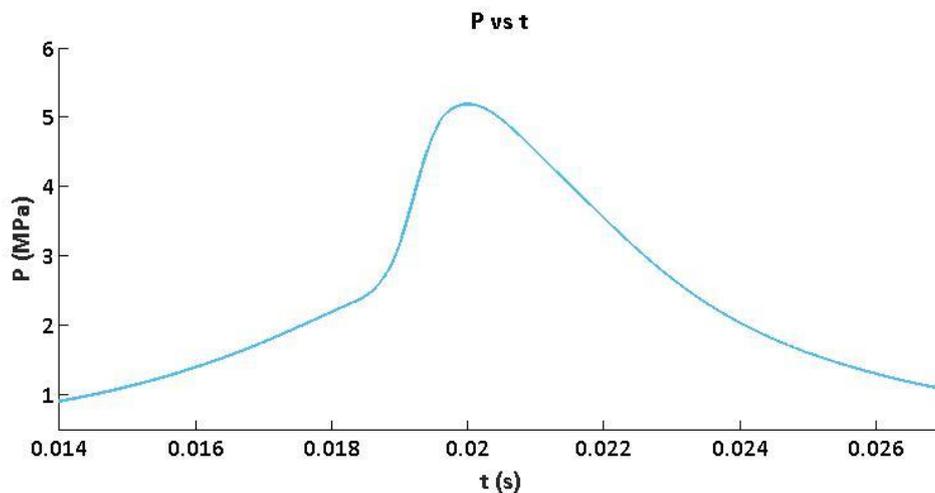


Figura 18. Ejemplo de ciclo con combustión.

Si la analizamos empezando por la fase de compresión, vemos que es exactamente igual hasta que se llega hasta un cierto instante. Este hecho es lógico pues la fase de compresión es exactamente igual en un caso con combustión que en un arrastre. Sin embargo, cuando la chispa de la bujía salta y se genera el inicio de la combustión, se produce un incremento en la pendiente de la curva, haciendo que la presión crezca con más rapidez.

Debido al fenómeno de la combustión se alcanzan presiones mucho más elevadas, dependiendo de la cantidad de combustible, el avance de encendido, la propia velocidad de la combustión...

Si la combustión se ha producido correctamente y se ha quemado gran parte de la mezcla, la fase de expansión será parecida a la del arrastre, aunque generalmente se desarrolla con valores algo superiores a los de un arrastre. Sin embargo, si la combustión no ha sido eficaz y ha quedado mezcla sin quemar, puede ocurrir que se produzca una combustión lenta de esta mezcla a lo largo de la fase de expansión, no obteniendo trabajo de esta combustión. Este suceso se vería representado en la curva de presión con una fase de expansión con pequeñas anomalías y valores notablemente superiores a la presión alcanzada en un arrastre.

En el fenómeno de *knock* del que se habló anteriormente, la gráfica de presión que se genera tiene una forma muy característica.

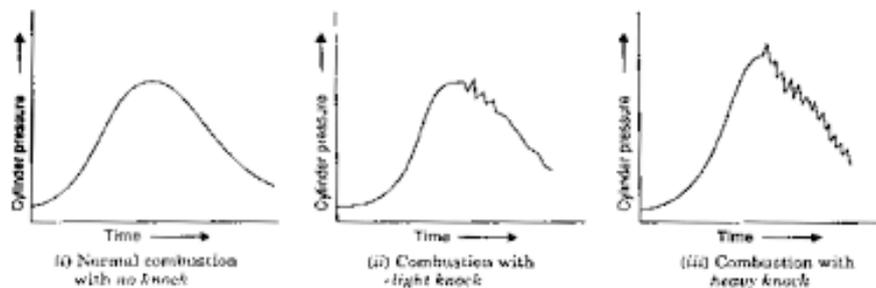


Figura 19. De izquierda a derecha: sin knock, knock moderado, knock brusco.[34]

Como se puede observar, se alcanzan valores de presión de pico muy elevados que suponen un gran estrés para los materiales del cilindro. Una vez se alcanza la presión de pico, ondas de presión se generan causando fluctuaciones en la presión de hasta 10 bar. En la gráfica, este suceso se ve representado por el brusco rizado previo a la expansión.

Para determinar características de la combustión los parámetros más importantes a estudiar en la curva de presión son:

- Fase de compresión: en esta curva se ve reflejada la relación de compresión del ciclo y es muy importante su valor porque influirá en los valores de pico alcanzados en el ensayo. Si la curva de compresión posee valores elevados, implica que la relación de compresión es elevada. Por otra parte, si se desea hacer una comparación entre curvas de presión distintas, la curva de compresión de ambos ciclos (y por tanto, la relación de compresión) debe ser muy similar. Si no es así, pueden extraerse conclusiones que no son ciertas.
- Punto de inicio de la combustión: este es el punto exacto en el que se ve un cambio en la pendiente de la curva hacia una más brusca. Del análisis de este parámetro se puede obtener información variada como una bujía dañada o un avance o retroceso del salto de la chispa excesivo. Además, en la comparación de distintos ciclos es también un factor decisivo para analizar distintos parámetros. Si se quiere estudiar otro efecto en concreto, el punto de encendido, al igual que la fase de compresión, deberá ser similar en los ciclos a comparar.
- Valor de la presión de pico: básicamente este parámetro sirve para determinar cómo de buena es una combustión. Si los valores son muy elevados (y no se produce *knock*), la combustión se está desarrollando correctamente.
- Fase de expansión: como se ha mencionado anteriormente, esta fase se analiza fundamentalmente para comprobar si toda o casi toda la mezcla introducida ha podido ser quemada.

2.4 TECNOLOGÍA TJI

En este apartado se va a presentar la tecnología TJI, objeto de estudio del presente trabajo. En primer lugar, se explicará el concepto de esta tecnología y sus generalidades, seguidamente se pasará a explicar los modos de funcionamiento más importantes y, por último, los parámetros más relevantes de esta tecnología.

2.4.1 TURBULENT JET IGNITION: GENERALIDADES

Fue en la década de los 50 donde se vio por primera vez un motor que presentaba un sistema de encendido por pre-cámara. Este sistema, presentado por la compañía Ricardo, puede considerarse como los orígenes de lo que hoy se conoce como TJI. En los años siguientes este tipo de sistema se utilizaría en motores experimentales como los motores que utilizaban hidrógeno, investigados en los 90's, o en los Honda Civics de los 70's. Sin embargo, fue en los automóviles de élite de la Fórmula 1 donde realmente surgió el concepto del TJI tal y como se conoce. Su mejora y adaptación en estos vehículos a partir de 2007 supuso una notable mejora en el rendimiento del automóvil, generando un gran interés en el mundo del motor.

A rasgos generales, el sistema *Turbulent Jet Ignition* (TJI) es un sistema de encendido por pre-cámara que aprovecha la combustión que se produce en el interior de ésta para iniciar la combustión en la cámara principal mediante chorros turbulentos provenientes de la propia pre-cámara. En la figura siguiente se presenta el esquema general de esta tecnología a partir del cual se explicará el funcionamiento de la misma

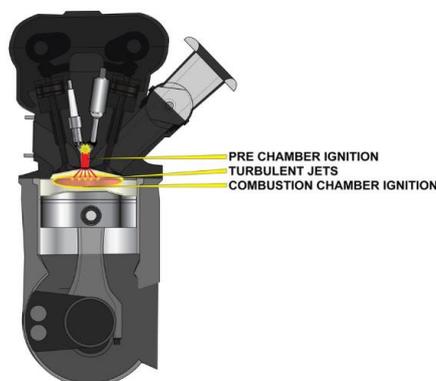


Figura 20. Sistema básico de encendido por pre-cámara.[20]

El punto de partida que se va a considerar es el de una mezcla pobre en la cámara principal y una mezcla cercana al dosado estequiométrico en la pre-cámara. Hay diferentes formas de crear esta configuración, que se detallarán en el capítulo siguiente. Partiendo de la base de que ambas mezclas son homogéneas y distribuidas, la carrera de compresión se inicia, aumentando poco a poco presión y temperatura en ambos volúmenes. La combustión se inicia como en un motor de gasolina convencional, mediante un agente externo que aporte la energía de activación. Normalmente en esta tecnología también se utiliza una bujía, aunque otros sistemas de activación están siendo estudiados, como los rayos láser o las microondas. La bujía, situada en la pre-cámara, hace saltar la chispa que inicia una combustión premezclada convencional con un frente de llama que se expande por toda la pre-cámara. Al elevarse enormemente la presión, la mezcla quemada no tiene más opción que salir eyectada a gran velocidad y turbulencia a través de los orificios que posee la pre-cámara y que la conecta con la cámara principal. Veremos más adelante que las características de los orificios tienen una gran importancia en el desarrollo de la combustión. Los chorros interactúan con la cámara principal y son los radicales activos de estos chorros, mencionados en el apartado anterior, los que se consideran como los precursores de la inminente combustión en la cámara principal. Con este sistema se consigue quemar con gran eficacia la mezcla pobre, pues se tienen varios puntos de encendido en lugar de uno solo. La combustión en la cámara principal guarda similitudes con una combustión por difusión y ésta se encuentra controlada por la tasa de mezcla existente entre los chorros y la mezcla principal. Cuanta más turbulencia se genere más rápido difundirá el calor hacia la mezcla sin quemar, por tanto, más rápida será la combustión.

La ventaja principal de este tipo de sistema es la posibilidad de trabajar satisfactoriamente con mezclas pobres lo que permite un menor gasto de combustible y por tanto la producción de menores emisiones. Asimismo, este proceso permite menores temperaturas de combustión lo que aleja a las condiciones del sistema de estar próximas a los valores críticos en donde puede aparecer el picado de biela o *knock*. La gran turbulencia con la que los chorros entran en la cámara principal permite una interacción muy rápida con la mezcla de la cámara principal, llegando a ser la tecnología TJI más rápida en realizar la combustión global. Al tener distintos puntos de encendido, se traduce en una combustión más homogénea en la que se quema prácticamente toda la mezcla, lo que permite mayores picos de presión y, por tanto, más trabajo obtenido.

Una segunda consecuencia de esto es que la combustión se produce en su mayor parte alejada de las paredes del cilindro lo que se traduce en menores pérdidas de calor a través de las paredes, obteniendo así más eficiencia.

Como se puede observar, posee muchas ventajas respecto al sistema de encendido convencional con bujía y al contrario que otras líneas de investigación, se presenta como una alternativa muy robusta en cuanto a su real aplicabilidad.

2.4.2 MODOS DE OPERACIÓN

La tecnología TJI permite distintas formas de realizar el proceso global de la combustión dependiendo de las características del sistema. En este estudio se va a clasificar su modo de operación en función de cómo se consigue la mezcla deseada tanto en la cámara principal como en la pre-cámara. Se distinguen dos tipos de aproximaciones: TJI pasivo y TJI activo.

SISTEMA TJI HOMOGÉNEO O PASIVO

La característica diferenciadora de este modo de operación es que solo existe una única inyección en el sistema, que genera la mezcla en ambos volúmenes. Esta inyección puede realizarse directamente en la cámara principal del cilindro durante la carrera de admisión, lo que permite mucho tiempo de mezcla entre el aire del cilindro y el combustible, por lo que la mezcla será lo suficientemente homogénea. Pero, por otro lado, este sistema también es capaz de trabajar con inyección indirecta al realizarse sobre las pipas de admisión.

Mediante la carrera de compresión el cilindro empuja parte de la mezcla hacia las zonas superiores lo que origina que ésta entre a la pre-cámara a través de los orificios. Este suceso es muy importante pues la bujía se encuentra situada en la pre-cámara y sin una cantidad suficiente de mezcla homogénea alrededor de la bujía podría producirse una mala o nula combustión. Al saltar la chispa, se produce la combustión premezclada en el interior de la pre-cámara. Gracias al volumen tan pequeño de ésta, la presión que se genera es suficiente como para que se produzca una eyección de los gases quemados a través de los orificios. Los radicales que pasan a la cámara principal deberían ser suficientes como para iniciar la combustión en ella de forma eficaz. Este sistema puede trabajar con dosados estequiométricos obteniendo resultados parecidos a los de un MEP convencional.

Sin embargo, si se trabaja con mezclas excesivamente pobres el sistema puede acercarse al límite de encendido, con lo que las pequeñas variaciones aquí juegan un papel muy importante. Una mínima variación en la cantidad de mezcla que entra en la pre-cámara o en la propagación de la combustión que se origina en ésta puede suponer una combustión muy mala o fallida.

La ventaja principal de este tipo de configuración es su sencillez constructiva y de funcionamiento. Se trata simplemente de un inyector que introduce la mezcla en el sistema, un pistón que sube desplazando parte de la mezcla a la pre-cámara y una bujía que hace saltar la chispa en ella.

Respecto a un motor convencional, si se trabaja con mezclas tan pobres en este mismo, la combustión, en caso de generarse, se acabaría apagando debido al gran volumen de la cámara, comparado con el de la pre-cámara. Además, con este sistema TJI se tienen varios puntos de encendido en lugar de uno, lo que supone más posibilidades de que se produzca una correcta combustión.

SISTEMA TJI ACTIVO O ESTRATIFICADO

Este tipo de funcionamiento de la tecnología TJI se diferencia del anterior en que posee dos inyecciones independientes. Así, un inyector se encarga de la mezcla de la cámara principal mientras que otro inyector auxiliar situado en la pre-cámara realiza la inyección en esta misma.

La primera acción que realiza este sistema es la inyección de la cámara principal en la carrera de admisión, como en cualquier TJI. Al igual que en el sistema anterior, una inyección en una fase tan temprana permite asegurar una mezcla totalmente homogénea. Durante la carrera de compresión, parte de la mezcla se introduce en la pre-cámara, pero ahora mediante una inyección auxiliar se corregirá el dosado relativo de la pre-cámara. El punto exacto de la inyección puede variar, pero suele estar en torno a 60 grados antes del PMS.

La bujía, que se encuentra en la pre-cámara, hace saltar la chispa que provoca una combustión premezclada potente en el interior de la pre-cámara, generando unos chorros muy turbulentos que salen a gran velocidad debido al gran aumento de la presión en el interior de este volumen. Generalmente, en la pre-cámara se trabaja con dosados cercanos al estequiométrico o ligeramente superiores, eliminando así cualquier peligro de que la combustión no llegue a iniciarse. Esto último implica una mayor cantidad de precursores de la combustión o radicales que junto con una mayor turbulencia y velocidad con la que salen los chorros, aseguran una correcta iniciación de la combustión.

En general, se produce una combustión más interesante que en el caso anterior, pues el frente de llama generado es más estable y los valores de presión máxima superan los valores convencionales de un motor MEP, cosa que no sucede en un TJI pasivo en el que se igualan dichos valores.

Por otro lado, al aumentar el número de variables a controlar (un inyector más) la complejidad de todo el sistema es mayor que en el caso anterior, pues se deben coordinar y sincronizar todos los procesos. Ahora ya no existe esa sencillez constructiva presentada en el TJI pasivo al introducir otro inyector en el sistema, que en ocasiones puede suponer toda una complicación. Sin embargo, aunque la complejidad del sistema sea mayor, esto permite un control mucho más preciso sobre el dosado en el cilindro, permitiendo además un plus de versatilidad al tener dos inyectores independientes.

La gran turbulencia de los chorros permite que el sistema sea capaz de trabajar con dosados realmente bajos en la cámara principal, algo que no sería posible en un MEP convencional. Debido a estos dosados bajos, las temperaturas alcanzadas no son muy elevadas, lo que aumenta de forma drástica la eficiencia térmica del motor y reduce enormemente las emisiones de NOx.

Con esta configuración se consiguen cargas muy homogéneas y una propagación del frente de llama muy estable en cada ciclo, lo que supone también una mejora en el aspecto de la dispersión cíclica del motor. Por otra parte, la presión suele mantenerse muy estable y equilibrada, lo que reduce la probabilidad de la aparición del *knock*. Además, debido a la rapidez en la interacción de los chorros con la mezcla de la cámara principal, se produce un desarrollo de la combustión muy rápido que extiende los límites del *knock*.

En resumen, el sistema TJI activo ha demostrado ser más interesante que el sistema pasivo pese a su mayor complejidad, consiguiendo una mayor eficiencia, y una mejora en la potencia y rendimiento del motor.

2.4.3 PARÁMETROS RELEVANTES DE LA TECNOLOGÍA TJI

En este apartado se presentan los factores de gran importancia que han sido estudiados hasta la fecha. Hay que tener en cuenta que la tecnología TJI se encuentra en pleno estudio de sus características y de los fenómenos que ocurren, por lo que aún se desconoce la influencia de otros parámetros en este sistema.

En el año 2010, W.P.Attard y P.Parsons llevaron a cabo un estudio que pretendía comprender la influencia de las variaciones en ciertos parámetros que tienen que ver con la bujía. Se observó que una variación en el tipo de bujía y su inclinación no suponían ningún cambio en el desarrollo de la combustión. Por otra parte, al variar la penetración de la bujía en la pre-cámara se afectaba ligeramente la estabilidad de la combustión, siendo más estable cuando se encontraba 2 mm más atrasada.

Otros estudios como el realizado en 2011 por W.P.Attard y H.Blaxill [5], utilizaron gasolina como combustible con resultados satisfactorios, obteniendo la conclusión de que el sistema funcionaba eficazmente en dosados pobres. También se observó una extensión de los límites del knock debido a un desarrollo de la combustión mucho más rápido. Además, se comprobó que la eficiencia térmica con la tecnología TJI se incrementó más de un 10% con respecto a un encendido con bujía convencional mientras que las emisiones de NOx descendieron a valores muy reducidos. Como se mencionó anteriormente, la eficiencia térmica se ve mejorada gracias a una pre-cámara pequeña con pocas pérdidas y un incremento en los puntos de encendido del sistema, y las emisiones de NOx se ven reducidas debido a los dosados pobres utilizados.

La geometría de la pre-cámara en la tecnología TJI tiene un papel muy importante porque influye en factores como la velocidad de salida de los chorros, el número de puntos de encendido, la turbulencia generada en cámara principal o el movimiento del aire, entre otros. En última instancia, tiene un gran impacto sobre la combustión y su eficacia, afectando así a la obtención de trabajo y al rendimiento global del motor.

Estudios previos como el realizado en 2015 por G.R.Gentz y E.Toulson [7] resaltaron la influencia que tiene el diámetro de los orificios de la pre-cámara en el comportamiento del sistema. El diámetro es uno de los parámetros que determina el área total de los orificios que es la que controla la cantidad de flujo que puede pasar a la cámara principal y las condiciones en las que lo hace.

A la hora de realizar un análisis de las curvas de presión obtenidas, los puntos de referencia están en el tiempo que se tarda en llegar a un 10% de la presión máxima del ensayo y el tiempo que transcurre hasta llegar al 90% de la misma. Idealmente se desea que el tiempo transcurrido entre el 10% y el 90% sea el mínimo posible.

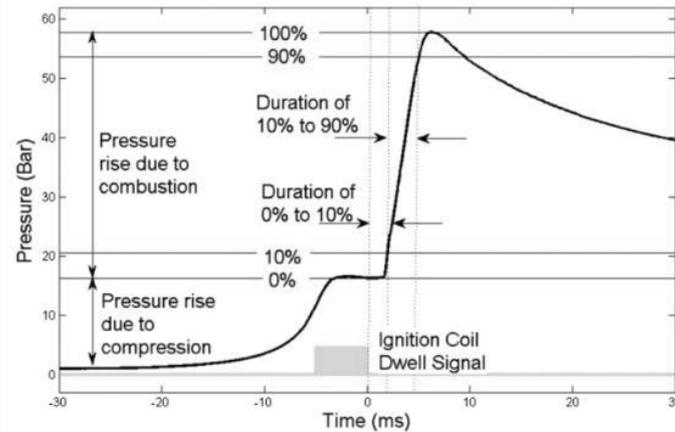


Figura 21. Gráfica de presión frente a tiempo e instante de encendido. [7]

Se estudiaron configuraciones de pre-cámara con un solo orificio, variando su diámetro desde 1 mm hasta 3 mm y geometrías con orificios múltiples desde 2 hasta 6.

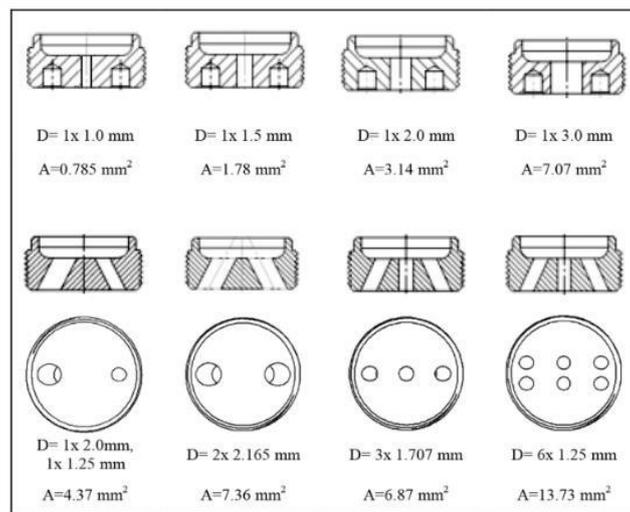


Figura 22. Configuraciones geométricas utilizadas en el estudio de G.R Gentz y E.Toulson [7]

Utilizando un modo de configuración en sistema pasivo, se obtuvo la conclusión de que para dosado estequiométrico la duración de la combustión hasta el 10% del valor de presión de pico era parecida en todas las configuraciones, sin embargo, la duración hasta el 90% era más rápida en las configuraciones de orificios múltiples. Por otro lado, si el dosado era rico, era la duración hasta el 10% más rápida para el orificio único y hasta el 90% la duración era parecida en todos los casos.

Comparando sistema activo y pasivo, el estudio refuerza la idea de que el sistema activo, en general, tiene mejores resultados que el pasivo, pues la duración del 0% al 10% del valor de la presión de pico es menor en el sistema activo y las variaciones cíclicas de la combustión son también menores.

Comparando la configuración de orificios múltiples con la de un solo orificio, la pre-cámara con más de un orificio obtuvo mejores resultados en la duración de la combustión hasta el 90% del valor de pico y además se ve una disminución de la dispersión de la duración de la combustión en este tipo de pre-cámaras.

Realizando un barrido de dosado fundamentalmente rico, se determinó que la mejor configuración de las probadas era la utilización del sistema activo con dosado estequiométrico en pre-cámara, dosado rico en cámara principal y doble orificio con 2.165 mm de diámetro.

2.5 TÉCNICAS DE VISUALIZACIÓN

En este apartado se hablará de las técnicas de visualización utilizadas para el estudio de la combustión en un motor de gasolina convencional. Las primeras técnicas utilizadas se basaban en los cambios en el índice de refracción provocados por una variación en las características físico-químicas del medio. Así, se puede estudiar un haz de luz cuyas características variarán en función del flujo por el que esté viajando y su composición. Un ejemplo de este ámbito es la fotografía *Schlieren* que se usaba para medir la variación de densidad de un flujo. Hoy en día esta técnica se ha digitalizado y ahora se basa en un procesado de imágenes mediante complejos algoritmos matemáticos. La mayoría de las técnicas tradicionales han continuado esta tendencia de digitalización, y hoy en día, tras la captación de la información mediante cualquier técnica óptica, le sigue un procesado de estas imágenes para extraer todo tipo de resultados. Aunque costosas, las técnicas de visualización son capaces de proporcionar una gran cantidad de información acerca de múltiples parámetros de la combustión.

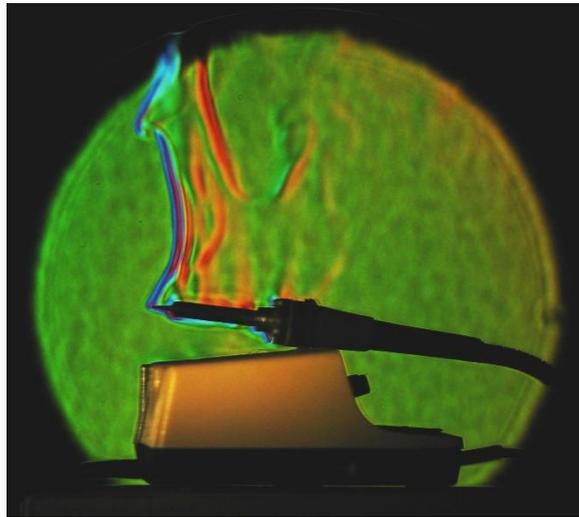


Figura 23. Fotografía Schlieren. [38]

En este contexto, las técnicas utilizadas se pueden clasificar macroscópicas y microscópicas.

Las técnicas de visualización macroscópicas tratan de estudiar parámetros o fenómenos observables a simple vista. El método comúnmente utilizado para la medida de estos parámetros es la visualización directa. Mediante este método se pueden estudiar parámetros como la geometría del rociado, la profundidad de penetración o el choque de pared.

El proceso típico es el uso de instalaciones experimentales que simulan las condiciones de presión y temperatura y que poseen accesos ópticos a través de los cuales se desarrollan este tipo de técnicas, obteniendo información muy valiosa. La variante utilizada en este estudio se denomina visualización de quimioluminiscencia con cámara intensificada, que puede realizarse a lo largo de todos los valores de longitud de onda (*broadband*) o sobre una longitud de onda concreta (visualización de radicales OH o CH fundamentalmente).

La fotografía sigue utilizándose para la captura de una imagen, pero normalmente se prefiere el uso de cinematografía a alta velocidad, porque permite la obtención de una película (vídeo) que muestra el desarrollo de la combustión. Cualquier conjunto de fotografías capturadas a más de 69 frames por segundo se considera cinematografía de alta velocidad. En el sector de la investigación se han popularizado las llamadas cámara rápidas, cada vez más veloces a la hora de realizar fotografías, llegando a realizar más de 100000 frames por segundo. Otros métodos son la cinematografía estereoscópica en la que se consigue un efecto 3-D de la imagen al grabarse desde dos perspectivas o la holografía, en la que se consigue el mismo efecto mediante el empleo de la luz y una película fotosensible.

Por otra parte, las técnicas de visualización microscópicas miden parámetros no observables a simple vista, como el tamaño de las gotas o la presencia de ciertos elementos en un flujo. Los métodos más importantes son el PIV (*Particle Image Velocity*), LIF (*Laser induced fluorescence*) y la PDPA (*Phase Doppler Particle Anemometer*).

La tecnología del PIV permite obtener el campo de velocidades instantáneas al completo. Consiste en medir la distancia que recorren de ciertas partículas (*seeding particles*) en un instante de tiempo conocido. Mediante un haz de luz se ilumina una región del flujo en movimiento, y mediante una cámara CCD se detecta la posición de estas partículas que aparecerán como manchas de luz sobre un fondo negro. Puesto que estas partículas llevan la velocidad del flujo, se llega a conocer el campo de velocidades que posee.

La técnica LIF utiliza la emisión de luz que produce un átomo o molécula al ser excitado por un rayo láser. Al aumentar su nivel electrónico, el elemento excitado eventualmente soltará la energía ganada emitiendo así un rayo fluorescente inducido. Este método se utiliza mayormente para medir las gotas de flujo líquido y el vapor del combustible al mismo tiempo.

Por último, el PDPA puede ser utilizado tanto para la medida de tamaños de gotas minúsculas como para la obtención de velocidades. En este sistema se establece un punto de medición definido mediante la intersección de dos rayos láser enfocados. Las partículas a medir dispersan la luz de estos rayos, y se mide el patrón de interferencia óptica que este suceso genera.

CAPÍTULO 3: EQUIPO EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA

En este apartado se mencionarán y describirán toda la instrumentación y elementos utilizados para la realización de los ensayos, así como su relación entre ellos.

ÍNDICE DEL APARTADO

3.1 MÁQUINA DE COMPRESIÓN-EXPANSIÓN RÁPIDA	46
3.1.1 COMPONENTES Y FUNCIONAMIENTO DE LA RCEM	47
3.1.2 SOFTWARE CAMAS	52
3.2 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL	55
3.2.1 SISTEMA DE INYECCIÓN.....	55
3.2.2 SISTEMA DE ENCENDIDO	58
3.2.3 SISTEMA DE VISUALIZACIÓN	59
3.2.4 ELEMENTOS FUNDAMENTALES DE LA INSTALACIÓN	63
3.2.5 ESQUEMA DE LA INSTALACIÓN	69
3.3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	70
3.3.1 CONDICIONES PREVIAS AL INICIO DE UN ENSAYO	70
3.3.2 PUESTA A PUNTO	71
3.3.3 PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE UN ENSAYO.....	73
3.3.4 RECOPIACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	75
3.3.5 PROCESADO DE LOS DATOS	76
3.3.6 METODOLOGÍA GENERAL DE REALIZACIÓN DEL ESTUDIO	79

3.1 MÁQUINA DE COMPRESIÓN-EXPANSIÓN RÁPIDA

La RCEM (*Rapid Compression-Expansion Machine*) es un dispositivo que permite reproducir un ciclo fundamental de un motor de combustión interna en condiciones controladas. Es utilizada en el ámbito de la investigación en el sector de la automoción, pues al simular las condiciones que se dan en un motor, permite realizar estudios de todo tipo, desde investigaciones detalladas sobre la ignición, transferencia de calor o movimiento del aire hasta visualización in situ de la combustión.

De un modo general, esta tecnología es capaz de replicar la carrera de compresión y expansión que se da en un motor alternativo, pero con un control muy preciso sobre los parámetros iniciales como la densidad o composición en cámara principal. El pistón encargado de realizar los movimientos de compresión y expansión es accionado por la diferencia de presiones entre la cámara de combustión y la cámara de accionamiento. Esta diferencia de presiones es llevada a cabo por un conjunto de válvulas neumáticas e hidráulicas. Tanto estos sistemas como el funcionamiento de la RCEM se explicarán de forma detallada en el apartado siguiente.

Por otra parte, como se explicó en el capítulo anterior, un motor es una máquina de carácter cíclico, pero con un funcionamiento continuo en el que muchos parámetros no pueden ser controlados debido a la alta velocidad del proceso o la complejidad que supondría. Si a esto último, se le suma un cierto grado de aleatoriedad en procesos como el movimiento del aire y la capacidad de mezcla que se ven afectados por ciclos anteriores, se obtiene una dinámica diferente en el comportamiento de la combustión ciclo a ciclo que debe tomarse en consideración.

Sin embargo, este fenómeno conocido como dispersión cíclica, se ve fuertemente minimizado en la RCEM, suponiendo una ventaja muy importante para esta máquina. Al contrario que en un motor donde se producen miles de ciclos por minuto, en la RCEM se realiza un ciclo cada 7 – 8 minutos, lo que da lugar a que cada ciclo sea independiente del anterior. Además, ciertas condiciones del ensayo como la temperatura inicial permiten ser controladas con gran precisión, que, junto con el hecho de que en este sistema no existan válvulas de admisión y escape, hacen de la RCEM un sistema muy robusto en cuanto a la dispersión cíclica.

Otras ventajas de esta máquina son la facilidad de ajustar las temperaturas de los componentes relevantes (pistón, culata...) mediante dispositivos calefactores, permitiendo un gran control sobre la temperatura. Asimismo, si se quiere realizar algún cambio en la configuración mecánica del pistón o realizar ciertas comprobaciones en la cámara de combustión, la RCEM permite un acceso más sencillo y amigable comparado con un motor real. Permite también simular de manera directa movimientos como el *swirl* o realizar ciclos con el sistema EGR (*Exhaust Gas Recirculation*) para el estudio de la influencia de este parámetro, convirtiéndola en una herramienta muy versátil para la realización de distintos estudios.

Este tipo de máquinas pertenecientes al ámbito de la investigación suelen tener ciertos diseños personalizados dependiendo del objetivo, pero sus fundamentos no cambian. En este caso, se ha hecho uso de la RCEM modelo TeRCM-K84, ideada por la empresa alemana TESTEM para el Centro de Motores Térmicos (CMT) de la Universitat Politècnica de València (UPV).

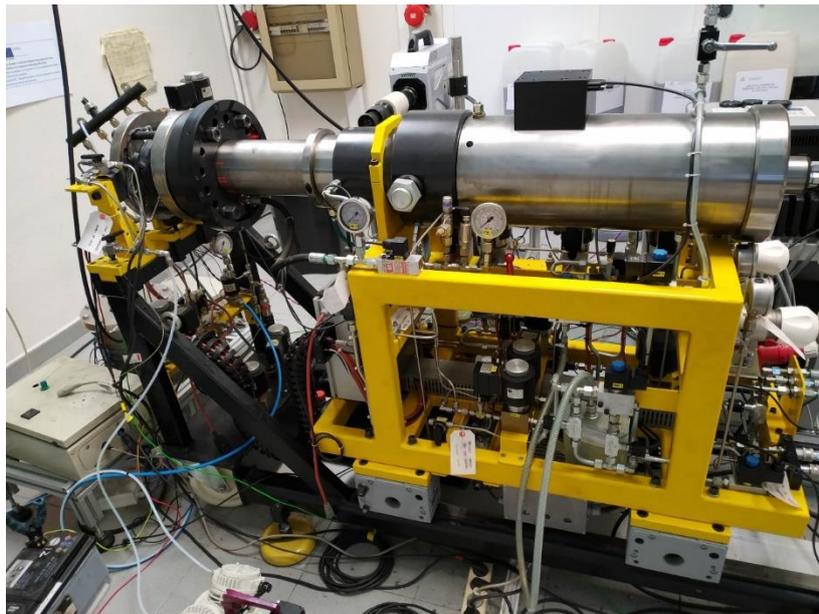


Figura 24. Máquina RCEM modelo TeRCM-K84 perteneciente al CMT.

3.1.1 COMPONENTES Y FUNCIONAMIENTO DE LA RCEM

La RCEM se puede dividir en dos zonas fundamentales: la zona experimental, y la zona de accionamiento del ensayo. En la primera se origina la combustión y el ensayo propiamente dicho, mientras que la segunda zona agrupa todos los componentes de la máquina que hacen posible llevar a cabo el ensayo.

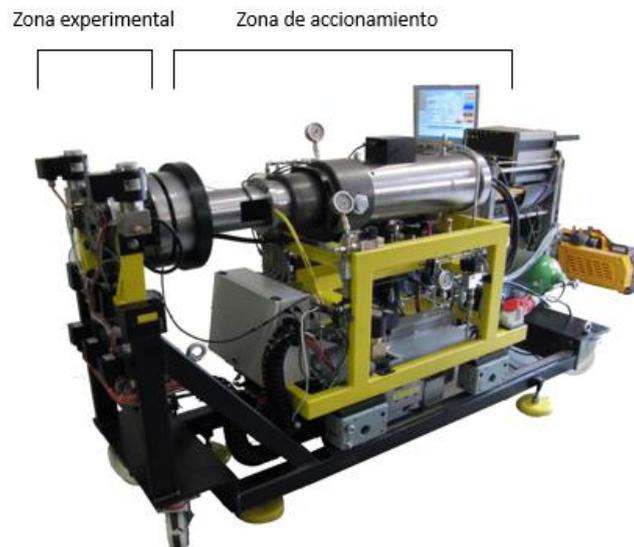


Figura 25. RCEM y sus dos zonas diferenciadas. [24]

La zona experimental es la “cabeza” de la máquina y está formada por la culata, las paredes del cilindro y la cámara de combustión. El resto de la máquina es lo que conforma la zona de accionamiento. Ambas partes de la RCEM pueden desacoplarse para proporcionar un acceso a la cámara de combustión para realizar limpiezas o cambios de configuración. El resto del tiempo ambas zonas están unidas mediante un sistema de tornillos y tuercas en el que el correcto par de apriete es proporcionado por un cierre hidráulico. Mediante leds y sensores de presión se comprueba que los tornillos están dispuestos correctamente, mientras que es la apertura manual de una válvula con la que se consigue alcanzar una presión de unos 80 bar que asegura la unión de estas dos zonas.

En la culata se insertan múltiples elementos como la bujía, los sensores de presión, los tornillos de unión... Además, a ella llegan los inyectores utilizados (en este caso 2) por lo que se tienen diversos sistemas en una zona reducida, lo que supone una gran acumulación de elementos como cables o tubos.

Por tanto, la manipulación de cualquier componente en esta zona debe realizarse con especial atención y cuidado debido a la complejidad de la misma.

La cámara de combustión es el área encerrada entre la culata y el pistón motor, que está situado en la cabeza del pistón conducido, como se verá más adelante.

Si se desea acceder a la cámara de combustión, como se comenta algunas líneas más arriba, deben separarse dichas zonas disminuyendo la presión del sistema y deshaciendo la unión roscada, para poder deslizar la zona de accionamiento separándola de la zona experimental mediante una guía – deslizadera para tal fin (Figura 26)

Así, la culata queda separada del resto de la máquina y la cámara de combustión queda al descubierto, permitiendo la comprobación y limpieza de todas las paredes implicadas incluida la del pistón motor. Alrededor de la cámara de combustión se dispone de un *liner* al que llegan los conductos de admisión y escape del aire y mediante el cual se calientan las zonas internas.

En el apartado [3.2.4] se presenta la cámara de combustión en detalle y sus particularidades.

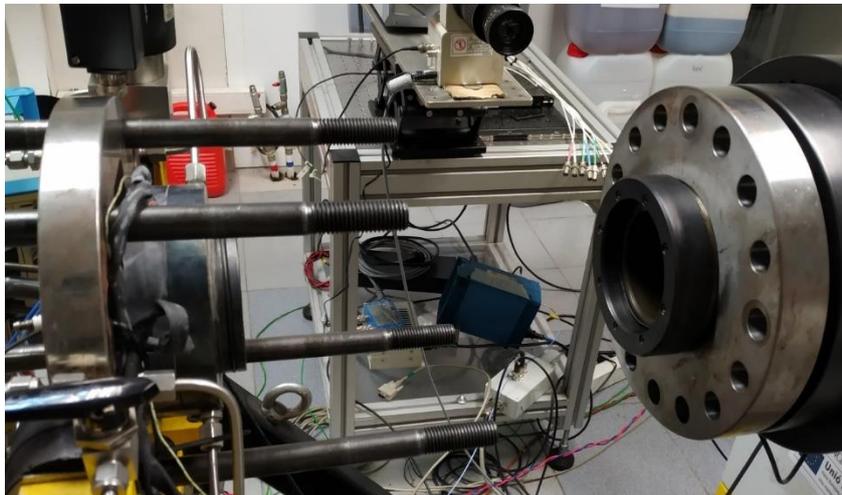


Figura 26. Detalle: unión roscada entre zona experimental y zona de accionamiento.

La zona de accionamiento está compuesta fundamentalmente de distintos pistones accionados desde un sistema electrónico que coordina los sistemas hidráulico y neumático, para la correcta realización de los ensayos y satisfacer otros muchos procesos. En la figura [27] se puede comprobar que coexisten hasta cuatro pistones distintos.

A continuación, se procede a explicar el procedimiento básico para la realización de un ensayo convencional utilizando el esquema de la siguiente figura.

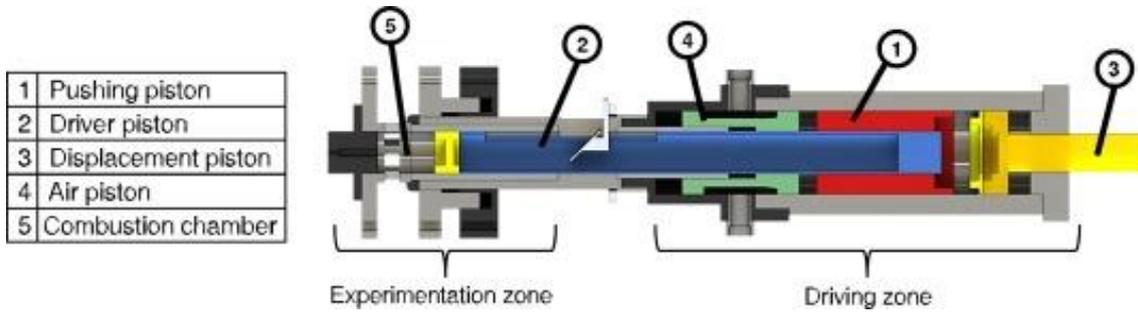


Figura 27. Esquema general de la RCEM.

Mediante el software propio de la RCEM, llamado CAMAS, se le da inicio al ensayo. Más adelante veremos las funciones de este software.

En primer lugar, se establece la carrera del ensayo. Para ello, se introduce aceite en la cavidad posterior al pistón (3) hasta la posición deseada. Es la posición de este pistón la que determina la carrera de compresión, que será realizada por el pistón (2). La posición del pistón (3) queda fija durante la realización de los ensayos debido a que no se produce ninguna variación en el volumen de aceite introducido. Seguidamente, se introduce aire en la cámara de combustión, empujando lentamente el pistón (2) hasta que se acople con el pistón (3). En este momento, se introduce aire en el pistón (4) mediante el sistema neumático. El llenado de este volumen es fundamental para la correcta realización del ensayo, pues este determina de forma indirecta la relación de compresión y el régimen de giro equivalente del ensayo. La presión alcanzada se denomina *Driving Gas Pressure* (DGP) y será un parámetro a determinar antes de la realización del ensayo. El circuito de aceite, que se encuentra hasta el momento presurizado debido al DGP, se equilibra mediante la apertura de una válvula de bypass en la parte anterior del pistón (2), originándose una fase de compresión lenta con un lento avance de este pistón. Se genera así una presión inicial en la cámara de combustión que favorece la homogeneidad de la mezcla. Simultáneamente a este avance, el pistón (1) se mueve en sentido contrario, lo que permite reducir en gran medida las vibraciones de todo el sistema.

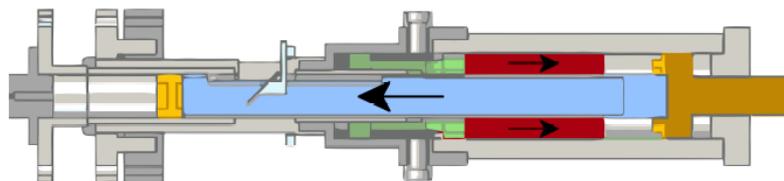


Figura 28. Movimiento de los pistones de la RCEM en la realización de un ensayo convencional.

Cuando se produce la desconexión entre el pistón (1) y (4) empieza la carrera de compresión rápida. El pistón (2) avanza a gran velocidad gracias a la fuerza de empuje que le transmite el aceite del sistema hidráulico. En el extremo de este pistón se encuentra un pistón real, simulando fielmente la carrera de compresión real de un motor. En este último, el pistón vuelve a su posición gracias al mecanismo biela-manivela, sin embargo, la RCEM no posee este sistema. La carrera de expansión se produce gracias al equilibrio de presiones: la propia compresión origina en la cámara de combustión un aumento en la presión, y cuando esta es superior a la presión generada por el pistón, hace que éste retroceda volviendo a la posición anterior. No obstante, cabe aclarar que la mayor parte de la carrera de expansión en la RCEM no es representativa del problema, mientras que la compresión se genera de forma fiel a la de un motor real.

Por último, se presentan los rangos y parámetros más importantes que la RCEM puede proporcionar en la siguiente tabla:

PARÁMETRO	VALOR/RANGO DE VALORES
Carrera	120 – 249 mm
Diámetro del pistón	84 mm
Régimen de giro equivalente	600 – 3000 rpm
Relación de compresión	5 – 25 bar
Presión de accionamiento (DGP)	15 – 50 bar
Presión máxima en cámara de combustión	200 bar
Temperatura máxima en pistón	100 °C
Temperatura máxima en culata	170 °C

Tabla 1. Parámetros relevantes de la RCEM modelo TeRCM-K84.[25]

3.1.2 SOFTWARE CAMAS

Mediante este software desarrollado por la propia empresa alemana TESTEM se dirige y controla toda la RCEM. En la siguiente imagen se puede observar la interfaz principal del programa:

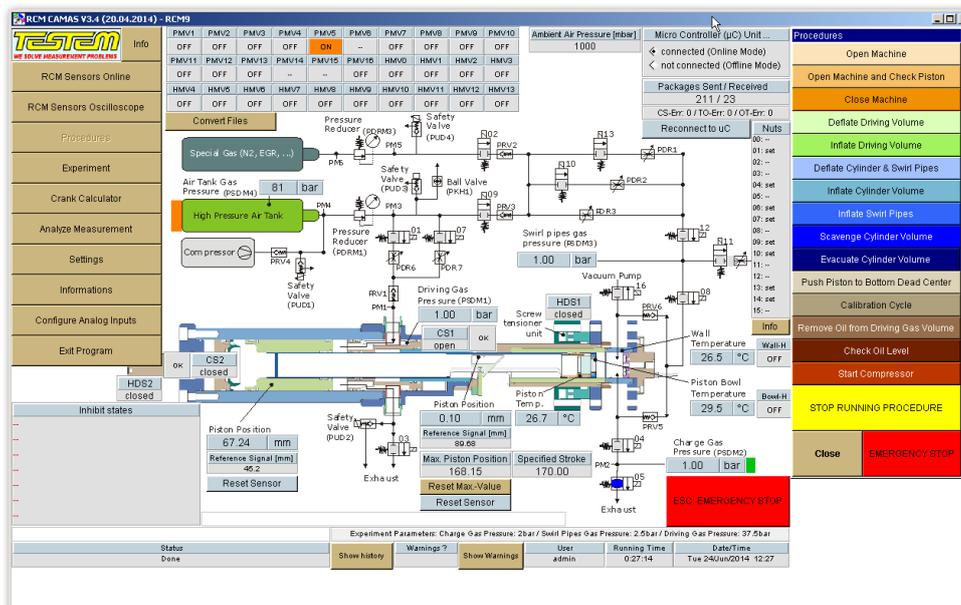


Figura 29. Interfaz del software CAMAS. [25]

Como se puede observar, se nos muestra un esquema de la máquina y las válvulas de relevancia que entran en juego. Podemos, además, observar a tiempo real los valores de presión y temperatura de ciertas zonas de la máquina.

En el margen izquierdo tenemos el menú principal, en el que tenemos dos apartados referentes a los sensores y el menú de procedimientos que se encuentra activado y en el margen derecho. Para cambiar los parámetros del ensayo a realizar, se deberá entrar en la pestaña de *Experiment*.

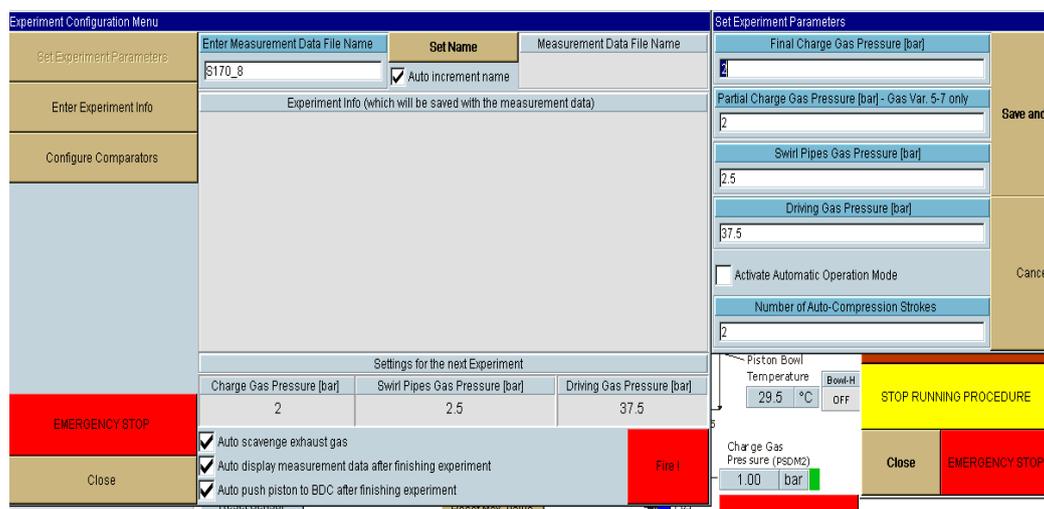


Figura 30. Pestaña de "Experiment" del software CAMAS. [25]

Como se puede ver en la figura superior, aparece un nuevo menú en el que podemos introducir los valores deseados de parámetros como la presión de *swirl* o la presión de *driving gas*, así como la presión inicial del ciclo. Es en esta ventana donde se encuentra el botón de inicio del ensayo "Fire!". Asimismo, en la pestaña de "Configure Comparators" podemos introducir los valores concretos de parámetros como posición exacta de la chispa de la bujía o posición exacta de la inyección en pre-cámara. Es muy importante comprobar que los valores introducidos son los correctos y deseados, pues un error en un parámetro como es el *driving gas* podría llevar a un choque del pistón con la culata. En el menú principal, entre otras opciones, también se encuentra la pestaña de *Settings* que permite realizar acciones como cambiar el modo de funcionamiento, activar y desactivar procesos como el *swirl* o introducir la alternativa del EGR.

Por otra parte, el menú de procedimientos situado en el margen derecho tiene una gran importancia pues contiene acciones muy importantes. Las más relevantes son:

- *Open Machine*: retira la presión en el interior de la máquina para permitir una apertura segura de la misma.
- *Open Machine and check piston*: realiza el mismo proceso que la operación anterior, pero esta deja el pistón en el PMS para que al abrir la máquina pueda extraerse el pistón real para su comprobación o recambio.
- *Close Machine*: es el procedimiento mediante el cual se cierra la máquina y se preparan los circuitos para su vuelta al funcionamiento.
- *Deflate Cylinder & Swirl Pipes*: Esta operación desinfla el cilindro y los conductos hasta la presión atmosférica. Es una operación necesaria tras un inflado del cilindro.
- *Inflate Cylinder Volume*: Este procedimiento introduce aire en la cámara para aumentar su presión. Se utiliza tras la limpieza de la cámara de combustión, que como se verá más adelante, se realiza con una bomba de vacío con lo que la presión en éste se queda por debajo de la atmosférica.

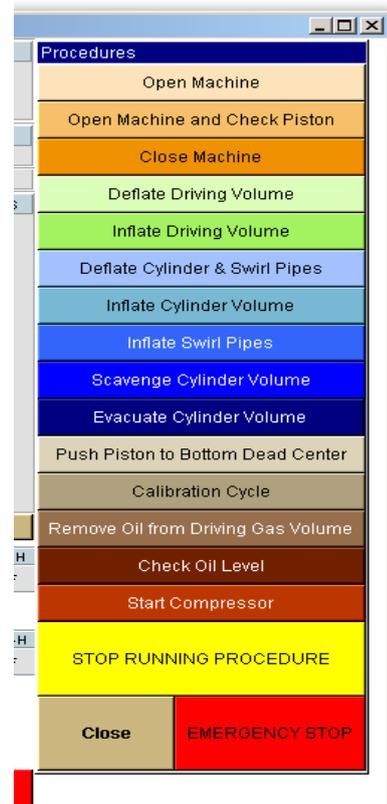


Figura 31. Procedimientos que permite realizar el software de la RCEM. [25]

Como se ha podido observar, el software posee múltiples opciones y herramientas para llevar a cabo las condiciones deseadas en los ensayos que se quieran realizar.

3.2 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

En este apartado se describirán los sistemas, componentes relevantes y todo tipo de elementos utilizados para la realización del estudio y su interacción con la RCEM.

3.2.1 SISTEMA DE INYECCIÓN

La inyección del combustible se realiza a través de este sistema, compuesto por el carro de inyección, los inyectores y los conductos.

El carro de inyección se compone de una bomba neumática, una bomba de baja presión de combustible, conductos de aspiración de aire y combustible y un *common rail*.

La bomba neumática es una bomba perteneciente al Centro de Motores Térmicos (CMT) de la marca Maximator. En esta bomba, el aire entra por la entrada de aire (1) a una presión entre 1 y 7 bar (gracias a su paso por una válvula reguladora de presión) dependiendo de los requerimientos, y un par de pistones con relación 1/750 consiguen comprimir el combustible para aumentar su presión. Su funcionamiento es cíclico, de tal forma que cuando la presión de inyección está por debajo del valor deseado, entra aire por la entrada de aire (2) y empuja el pistón de mayor tamaño, haciéndolo descender.

Al descender, el pistón pequeño en el otro extremo también descende permitiendo la entrada de combustible nuevo y volviendo a repetirse el ciclo de compresión. Una válvula anti-retorno se ocupa de que el combustible a alta presión no vuelva a la bomba neumática. Al no haber circuito de recirculación, no se requiere de ningún sistema de refrigeración al contrario que otro tipo de bombas.

La bomba neumática posee su propio software mediante el cual se introducen los valores de presión deseados. Las características de la bomba neumática se presentan en la siguiente tabla:

PRESIÓN MÁXIMA	4000 bar
TEMPERATURA MÁXIMA	+20°C / +40°C
VOLUMEN	4 CC
DIÁMETRO NOMINAL	3.2 mm
RELACIÓN DE COMPRESIÓN	1/750
FLUIDO	Líquido
PRESIÓN AIRE DE ENTRADA	1 – 7 bar
Lxwxh	450x345x575
PESO	47 kg
NÚMERO DE SERIE	17172
AÑO DE FABRICACIÓN	10/2014

Tabla 2. Características de la bomba neumática.

Para la entrada de nuevo combustible en la bomba neumática se utiliza una pequeña bomba a la salida del tanque de combustible. La salida de la bomba neumática va a un depósito de alta presión por el que pasa el combustible presurizado. Por último, el combustible entra en un *common rail* que alimenta a los dos inyectores, el de la cámara principal y el de la pre-cámara. El combustible que no se utilice vuelve al tanque de combustible a través de un sistema de retorno. Por último, una válvula reguladora se ocupa de controlar que la presión en el *common rail* sea la adecuada.

En cuanto a los inyectores, ya se explicó su funcionamiento en el apartado [2.3.5] del presente documento.

En este estudio se utilizan dos inyectores idénticos tanto para la inyección principal como para la auxiliar en pre-cámara. En cuanto a la posición de estos elementos, el inyector de la pre-cámara está ubicado a la derecha del centro de la misma, como se puede observar en la figura [42]. El inyector de la cámara principal se encuentra en la zona inferior de la cámara de combustión. En la siguiente figura puede observarse como el inyector principal se inserta totalmente perpendicular a la pared de la culata, mientras que el inyector auxiliar posee una cierta angulación para generar una trayectoria favorable del combustible hacia la bujía

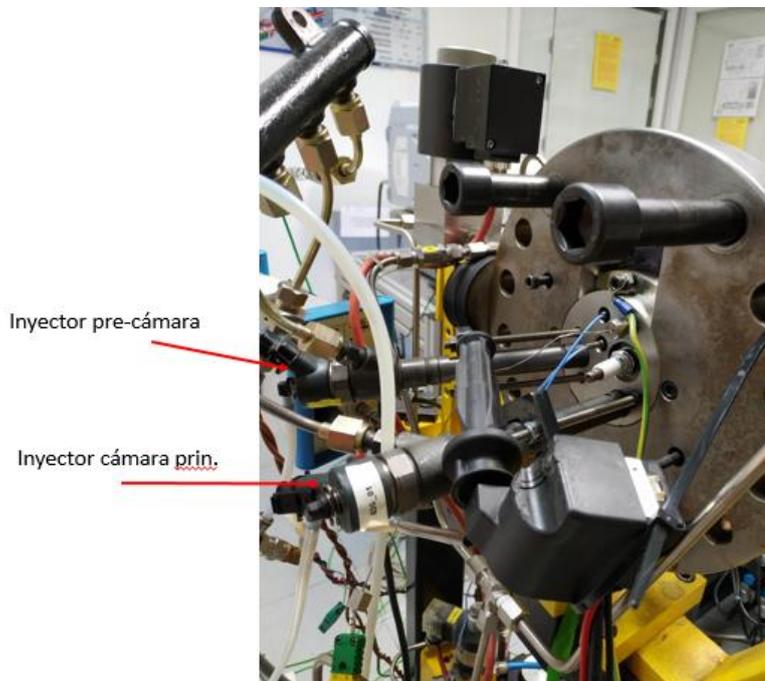


Figura 32. Inyectores y su posición en la culata.

Además, ambos inyectores son mono-orificio con el fin de evitar el choque de pared que se ve favorecido cuando hay más de un orificio.

En la siguiente tabla se especifican las características de los inyectores utilizados (los datos técnicos están protegidos por el fabricante):

FABRICANTE	BOSCH
TIPO	SOLENOIDE 2.2
MODELO	B445116 756-01
NÚMERO DE ORIFICIOS	1
TIPO	CÓNICO
DIÁMETRO DE SALIDA(mm)	0.156 principal / 0.87 auxiliar

Tabla 3. Características del inyector.

3.2.2 SISTEMA DE ENCENDIDO

El sistema de encendido es el encargado de iniciar la combustión en la pre-cámara mediante un aporte de energía de activación que se realiza mediante un arco eléctrico que se produce entre los electrodos de una bujía. Para proporcionarle la energía necesaria, la electrónica de esta bujía va conectada mediante cables a una batería común de automóvil. Una bobina que lleva integrado un ruptor es la encargada de generar la carga eléctrica. El valor del arco eléctrico se mide mediante una pinza amperimétrica y suele rondar los 22 A. En la siguiente tabla se detallan las características tanto de la bujía como de la bobina.



Figura 33. Bujía BERU modelo 10FR-6CPU03

FABRICANTE	BERU
MODELO	10FR-6CPU03
TIPO	INSTRUMENTADA
DISTANCIA ENTRE ELECTRÓDOS	0.8 mm
ROSCA	M12x1.25 mm
LONGITUD DE ROSCA	25 mm
PESO	44 g

Tabla 4. Datos de la bujía.

FABRICANTE	DELPHI
MODELO	SB 61223
VOLTAJE NOMINAL	14 V
INTENSIDAD NOMINAL	19 / 21 A
PESO	235 g
TIEMPO DE CARGA	610 / 690 μ s

Tabla 5. Datos de la bobina. [26]

3.2.3 SISTEMA DE VISUALIZACIÓN

La RCEM permite la visualización de la combustión a través de un acceso visual.



Figura 34. Acceso visual RCEM. [27]

Una cámara rápida especial para la visualización del fenómeno de la combustión se coloca apuntando al acceso visual. Éste contiene un espejo que mediante un soporte se coloca a unos 45 grados de tal forma que la cámara de combustión se refleje en este espejo y la cámara sea capaz de grabarlo.

Con el fin de poder observar con una intensidad adecuada la combustión se utiliza un dispositivo intensificador que aumenta la intensidad de las imágenes captadas. A su vez, un objetivo ultravioleta profesional es utilizado para obtener esta parte del espectro de la luz.

Pero todo esto de nada sirve si no se posee un pistón transparente, pues es a través de él mediante el cual la luz pasa, pudiendo observarse la combustión. Además de ser transparente y no presentar demasiadas deformidades que produzcan aberraciones en la imagen, el material debe ser muy resistente pues debe soportar presiones y temperaturas muy elevadas. El material utilizado es el cuarzo, que posee las características ya descritas.



Figura 35. Pistón transparente con el espejo al fondo.

DIÁMETRO EXTERNO DEL PISTÓN	84 mm
DIÁMETRO DEL ACCESO VISUAL	46 mm
ESPEJOR DEL ACCESO VISUAL	20 mm
MATERIAL	Cuarzo
GEOMETRÍA	PISTÓN PLANO

Tabla 6. Características principales del pistón real.

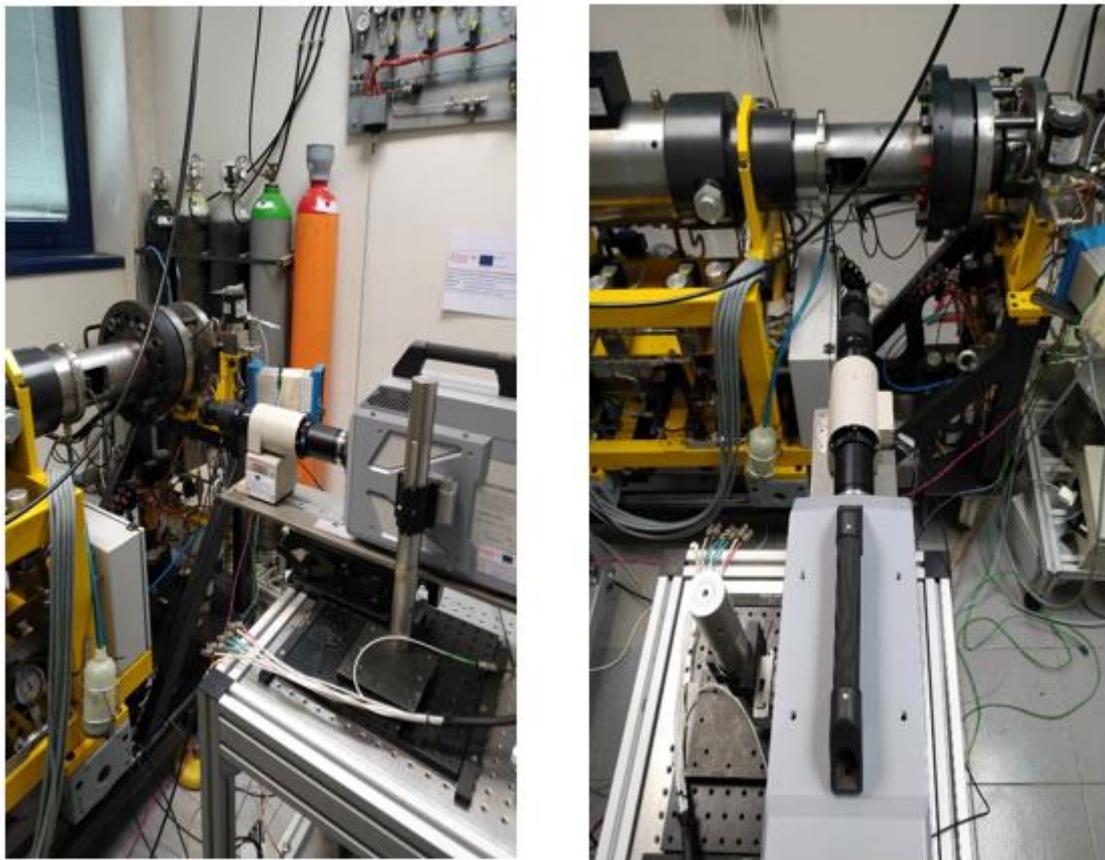


Figura 36. Montaje del sistema de visualización

La cámara rápida utilizada para la captación visual del ensayo es una Photron fastcam SA-Z. Es una cámara muy potente capaz de grabar hasta a 2 millones de *frames per second* (imágenes por segundo) con una imagen reducida y con una velocidad de obturación de 159 nanosegundos. A continuación, se muestran sus características principales.

FABRICANTE	PHOTRON
MODELO	FASTCAM SA-Z 2100K – M – 16GB
NÚMERO DE SERIE	10202435403 - S
MAXIMUM FRAME RATE	2.100.000 FPS
SENSOR DE IMÁGEN CMOS 1 MPX	768x512 a 50.400 fps
OBTURADOR ELECTRÓNICO GLOBAL	1 ms a 150 ns
RANGO DINÁMICO	12bit monocromático. 36 bit a color
MEMORIA INTERNA	16 GB

Tabla 7. Características principales de la FastCam SA-Z [28]

En cuanto al dispositivo intensificador, se trata de una unidad intensificadora de imagen cerrada de alta velocidad que es muy importante si se quieren realizar visualizaciones de especies concretas, pues se necesita intensificar la radiación lumínica que este elemento emita. En los estudios de visualización de la combustión un elemento que suele ser muy estudiado son la presencia de OH* que emiten luz en la banda de 310 nm. Las características del intensificador se muestran en la siguiente tabla:

FABRICANTE	HAMAMATSU
MODELO	C10880-03F
NÚMERO DE SERIE	GHD1812-0071
SENSIBILIDAD A LA LUZ	230 μ A/lm
RESPUESTA ESPECTRAL	185 a 900 nm
GANACIA ESPECTRAL	1×10^5 (lm/m ²)/lx
RESOLUCIÓN LIMITANTE	38 Lp/mm

Tabla 8. Características del intensificador. [29]

En cuanto al software de visualización, el intensificador tiene uno propio mediante el cual se controla la propia intensidad proporcionada. Además, dispone de un medidor de saturación a tiempo real, en el que se pueden observar los niveles de saturación que alcanza el intensificador. Si éste satura, el software desactiva el intensificador para no dañarlo, y muestra un mensaje de error.

Por otro lado, el software que controla la cámara es el Photron Fastcam Viewer. Este tiene multitud de opciones para diversas finalidades, puede aumentar el parámetro gamma para aumentar el brillo de la imagen (aunque también introduce ruido), realizar giros de la imagen, hacer zoom, medir las coordenadas de ciertos puntos...Es muy importante establecer la configuración de grabación, eligiendo la ventana de imagen adecuada con los fps deseados. Más adelante, cuando se hable de la metodología y la rutina seguida, se detallarán estas configuraciones empleadas. Además, en el propio software se cargan ensayos ya grabados pudiendo cargar varios a la vez para hacer comparaciones, con funciones básicas de pausar, retroceder, avanzar con la velocidad deseada o *frame por frame*.

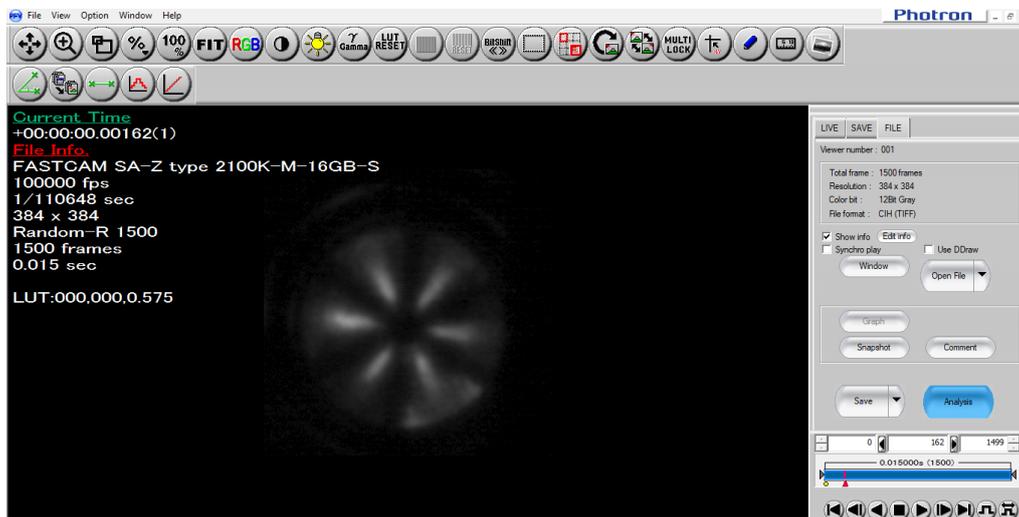


Figura 37. Software de visualización.[25]

3.2.4 ELEMENTOS FUNDAMENTALES DE LA INSTALACIÓN

En este apartado se hablará de componentes de la instalación que hacen funciones importantes en la correcta realización de un ensayo.

BOMBA DE VACÍO

Mediante este dispositivo se realiza la expulsión de los gases quemados, dando lugar al proceso de renovación de la carga. La cámara de combustión tiene una cavidad que mediante conductos de aluminio comunica con la bomba de vacío. Cuando ésta se pone en funcionamiento, succiona el fluido de la cámara de combustión disminuyendo así la presión en el interior por debajo de la presión atmosférica. Es fundamental la limpieza de la cámara de combustión tras cada ensayo que se realice, llegando incluso a realizar varias limpiezas en ciertos casos, como se verá más adelante. Si quedan demasiados elementos residuales acumulados en la cámara, pueden afectar en el ensayo influyendo en los resultados obtenidos. En la siguiente tabla se muestran las características principales de la bomba de vacío:

FABRICANTE	KNF
MODELO	N035.3AN.18
NÚMERO DE SERIE	7345288
PODER DE SUCCIÓN	30 l/min
PRESIÓN DE OPERACIÓN	4 bar
PESO	8.5 kg
TEMP. AMBIENTE PERMISIBLE	40 °C

Tabla 9. Características principales de la bomba de vacío.[31]

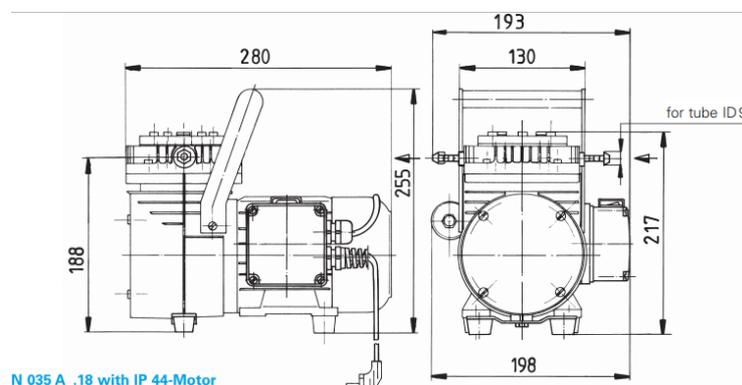


Figura 38. Planos de las dimensiones de la bomba de vacío. [31]

Hay que tener en cuenta qué si el sistema de inyección no está en marcha y se pretende realizar una limpieza de la cámara de combustión mediante la bomba, se puede producir el efecto contrario. Esto es debido a un desequilibrio de fuerzas: al no haber presión de inyección, la aguja del inyector no está empujada en su asiento por lo que no cierra bien (ni se deforma elásticamente). Si ahora se considera la fuerza que realiza la bomba para generar vacío, se tiene una succión del combustible hacia la cámara de combustión, que lejos de limpiar este volumen, puede llevar a situaciones no deseadas cuando se vuelva a poner en marcha el sistema.

OSCILOSCOPIO

El osciloscopio es un elemento fundamental en la instalación, pues a él se conectan todos los sensores que proporcionan los datos recogidos del ensayo y de él se extraerán para su posterior procesado y análisis. El osciloscopio utilizado es un Yokogawa modelo DL850V con múltiples opciones de visualización de las señales que recoge y con una gran precisión de adquisición. Este aparato posee hasta un máximo de 16 entradas, pero como se verá más adelante, en el estudio solo se precisaron ocho.

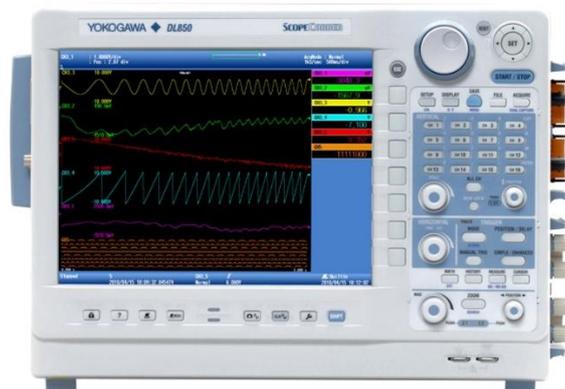


Figura 39. Yokogawa DL850V.[35]

Cada ensayo en el Yokogawa se guarda como un archivo único y este puede ser cargado para su visualización en cualquier momento, o incluso superponerlo al ensayo siguiente para su comparación. Mediante conexión *ethernet* el osciloscopio puede conectarse con un ordenador y volcar todos los datos en éste.

La frecuencia de adquisición utilizada para los ensayos realizados es de 10 MHz, pero más adelante en el post-procesado se baja a 1 MHz para obtener una resolución de 1 μ s.

REGLA MAGNÉTICA

La regla es un dispositivo utilizado en este estudio para medir la posición del pistón. Esta medida es fundamental y debe ser muy precisa pues la mayoría de los *triggers* de los sensores van referenciados con la posición. En este estudio, se tiene una precisión de 0.01 mm.

Para la utilización de esta herramienta se dispone de una banda magnética dispuesta en el interior del pistón (2) que realiza la carrera de compresión. Esta banda dispone de pequeños bultos con una separación muy estrecha que se distribuyen por toda la banda. Un soporte interno que se mantiene fijo permite incorporar un sensor de efecto hall en su extremo que se divide en dos partes A y B. Este extremo se encuentra muy próximo a la banda magnética y cuando se produce movimiento en ésta, en los sensores A y B se induce una corriente eléctrica (de señal cuadrada) debido a la presencia del campo magnético con movimiento relativo a la vaina (efecto *Hall*).

La separación entre los sensores permite determinar si el pistón se encuentra avanzando hacia el PMS o retrocediendo en su recorrido. Esto es debido a que esta separación cuando se recogen las dos señales cuadradas se traduce en un desfase de estas señales fácilmente observable. Si se observa la figura de la derecha, la parte superior ejemplifica una carrera de expansión mientras que la parte inferior corresponde a una carrera de compresión.

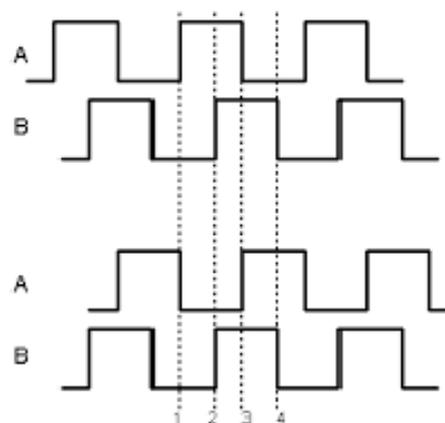


Figura 40. Señales cuadradas desfasadas[33]

SENSORES DE TEMPERATURA Y PRESIÓN

La medida de la temperatura se realiza mediante sensores termopares. Estos dispositivos captan la diferencia de temperatura entre sus dos extremos lo que genera una diferencia de potencial, originando una corriente eléctrica. Tras la correcta calibración del termopar, se determina la función que relaciona esta diferencia de potencial con la temperatura real del volumen que se desee medir.

Los termopares más importantes de la instalación son los que miden la temperatura del tanque de combustible y la de la culata. Si la temperatura del combustible es demasiado elevada podría llegar a fundir el material del depósito, y su incremento de la temperatura afectaría en su densidad y viscosidad y, por tanto, en el cálculo de la masa inyectada.

La temperatura de la culata se monitorea en la puesta a punto para la realización de los ensayos para conseguir llegar a las condiciones de temperatura inicial del ciclo deseada.

En este estudio la medida de la presión va a ser un proceso fundamental pues se analizarán las curvas de presión obtenidas en los distintos ensayos para obtener conclusiones. Para ello, se dispone de un sensor de presión piezoeléctrico que utiliza la polarización originada por la deformación que sufren cristales como el cuarzo al ser sometidos a cargas. Esta polarización se traduce en una diferencia de potencial que genera una corriente eléctrica.

Los sensores de presión más importantes son los que miden la presión en pre-cámara, cámara principal y presión de inyección. El valor de ésta última se envía a un control PID para su análisis y control. Ambos sensores localizados en la cámara de combustión son externos. Para la captación de la presión en la pre-cámara se usó un sensor AVL mientras que para la cámara principal de utilizó un sensor KISTLER.

FABRICANTE	AVL	KISTLER
MODELO	Z133	6045A
RANGO DE MEDIDA	0 – 250 bar	0 -250 bar
PRESIÓN MÁXIMA	300 bar	250 bar
SENSIBILIDAD	11 pC/bar	45 pC/bar
SENSIBILIDAD DE ACCELERACIÓN	0.1 mbar/g	0.8 mbar/g
RANGO DE TEMPERATURAS	233 – 623 K	253 – 623 K
PAR DE APRIETE	15 -25 Nm	6 Nm

Tabla 10. Características sensores de presión de la cámara de combustión.



Figura 41. Dimensiones del sensor de presión AVL.[30]

DETALLE: CÁMARA DE COMBUSTIÓN

En este apartado se muestra el conjunto que conforma la cámara de combustión y su posición espacial. Como se explicó en apartados anteriores, para acceder a la cámara de combustión hay que deshacer la unión roscada, separando culata del resto de la máquina.

En la siguiente figura se puede observar cómo es la distribución de la cámara de combustión.

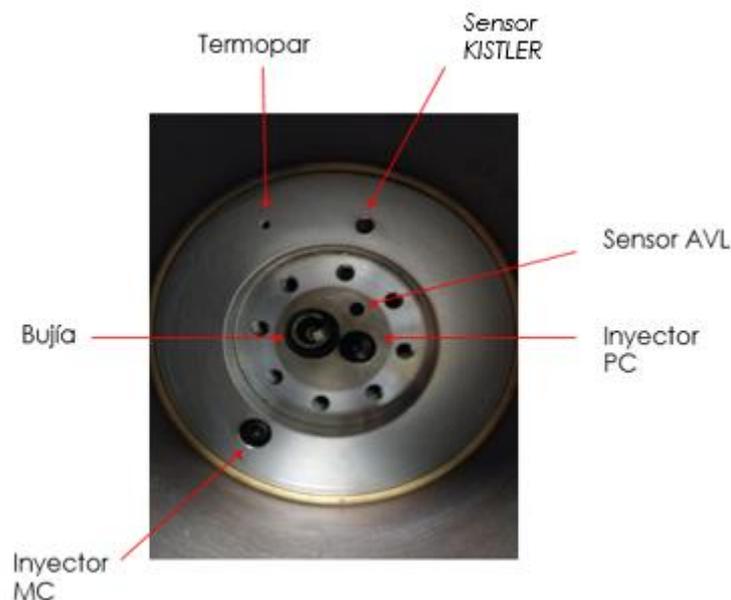


Figura 42. Cámara de combustión y sus elementos.

Se puede observar una zona central circular con un color más oscuro. Esta zona es precisamente la correspondiente a la pre-cámara, en la que se realiza la combustión inicial. En esta zona vemos la bujía y el inyector auxiliar. El agujero más pequeño es el correspondiente al sensor de presión de la pre-cámara. Mediante ocho tornillos de 2.5 mm la pre-cámara se fija a la culata.

Fuera de la pre-cámara se encuentra en la zona inferior el inyector de la cámara principal, y en la zona superior se encuentra el termopar, cuya función es medir la temperatura inicial del aire en cámara de combustión.

Esta medida se utiliza únicamente para monitorear su temperatura previa a la realización de un ensayo, pues como se mencionó anteriormente, el termopar no es capaz de captar los incrementos tan grandes y tan rápidos de la combustión. A su derecha se encuentra el sensor de presión de la cámara principal.

PRE-CÁMARAS

A continuación, se presentan las pre-cámaras que han sido objeto de estudio del presente trabajo. Pese a las diferencias que distinguen a las pre-cámaras, comparten las siguientes características generales:

DIÁMETRO EXTERIOR	47 mm
DIÁMETRO AVELLANADO	35 mm
DIÁMETRO BASE CONO	16 mm
DIÁMETRO PUNTA CONO	9.1 mm
ÁREA TOTAL DE LOS ORIFICIOS	$1.06 \times 10^{-5} \text{ m}^3$
FORMA	CÓNICA
ANCHO TOTAL	13 mm
INCLINACIÓN DE LOS ORIFICIOS	60°
VOLUMEN	$3.13 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
MATERIAL	ACERO INOXIDABLE

Tabla 11. Características comunes de todas las pre-cámaras.

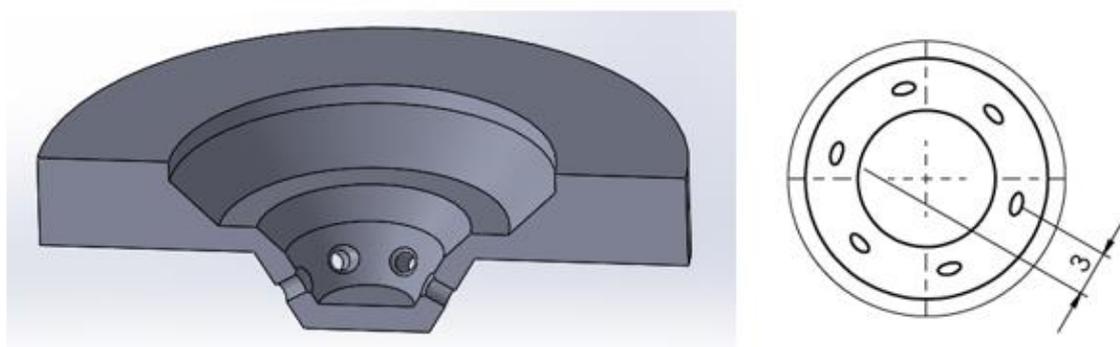


Figura 43. Vista de sección de una pre-cámara y el desfase de 3 mm.

Además de estas características, en los planos adjuntos se pueden comprobar el resto de aspectos geométricos.

En la siguiente tabla se muestra la nomenclatura que se utilizará para diferenciar las distintas pre-cámaras, así como sus características diferenciadoras.

PRE-CÁMARA	Nº DE ORIFICIOS	DEFASE ENTRE ORIFICIOS(mm)	ORIFICIO AXIAL	DIÁMETRO DE ORIFICIOS(mm)
1	6	NO	NO	1.5
2	6	SÍ (3mm)	NO	1.5
3	8	SÍ (3mm)	NO	1.3
4	4	SÍ (3mm)	NO	1.84
5	7	SÍ (3mm)	SÍ	1.39

Tabla 12. Nomenclatura de las pre-cámaras y sus características geométricas principales.



Figura 44. Pre-cámaras, en orden numérico de izquierda a derecha.

3.2.5 ESQUEMA DE LA INSTALACIÓN

A continuación, se representa un esquema simplificado de la instalación para la completa comprensión de los elementos más importantes que intervienen y su relación entre ellos:

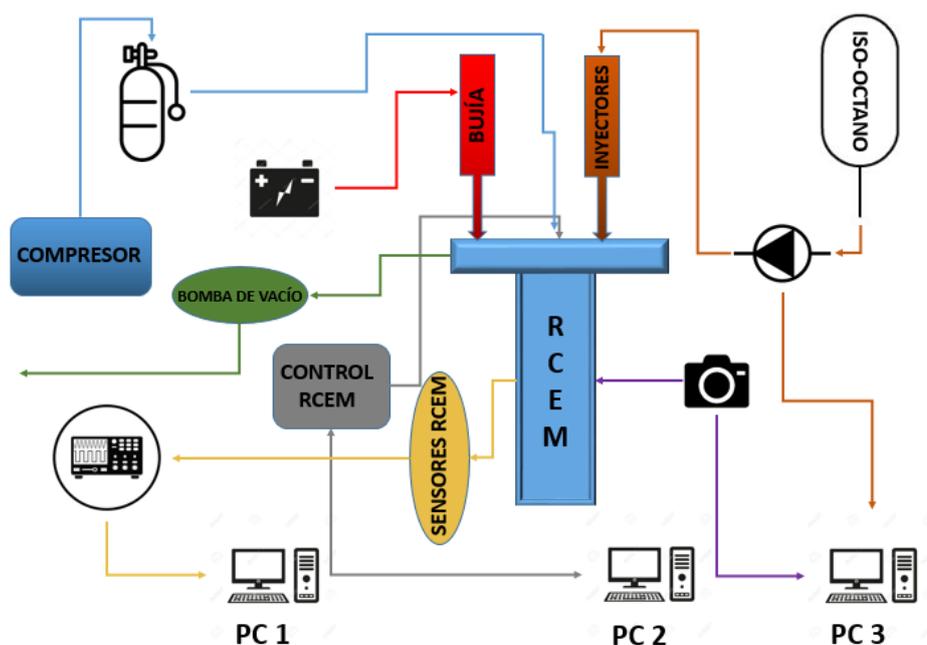


Figura 45. Esquema simplificado de la instalación.

- Azul: sistema de aprovisionamiento de aire
- Rojo: sistema de encendido
- Marrón: sistema de inyección
- Verde: sistema de expulsión de los gases
- Gris: sistema de control sobre la RCEM
- Amarillo: sistema de adquisición
- Morado: sistema de visualización

3.3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este apartado se detallará el procedimiento utilizado para la realización de todos los ensayos y la obtención de los resultados del trabajo.

3.3.1 CONDICIONES PREVIAS AL INICIO DE UN ENSAYO

Antes de poner la máquina en funcionamiento hay que realizar distintas acciones, las cuales se detallarán a continuación.

Una condición necesaria para poder ensayar es llegar a las condiciones óptimas en las que se quiere realizar el ensayo. Esto implica tener cierta temperatura en la culata y en el cilindro, simulando las temperaturas que estos dos elementos experimentan en un motor real. Esta temperatura suele rondar los 90 – 100 grados Celsius, por lo que esa será la temperatura a la que deberán estar esos elementos para la correcta realización de un test. Para tal fin, se dispone de un conjunto de resistencias distribuidas en un *liner* que permiten que tanto el material como el aire se calienten. Al sistema le toma entre una hora o una hora y media llegar a la temperatura de 90°C, por lo que el primer paso será el encendido de las resistencias, el termopar de la culata y el *rack* al que va conectado. El *rack* es un dispositivo al que se conectan transductores y sensores, y éste muestra en su *display* los parámetros que los sensores están captando. Mediante este aparato se monitoriza la temperatura en la culata hasta llegar a la deseada.



Figura 46. Rack.

Mientras la culata y el interior del cilindro se van calentando, puede realizarse el encendido de todos los elementos que, de alguna u otra forma, participarán en el ensayo o en la recogida de datos de éste. Estos elementos son los siguientes:

- Transductores y sensores de toda la instalación
- Cámara rápida
- Intensificador
- Sistema de inyección (bomba neumática)
- Control de la RCEM
- Ordenadores de la instalación
- Osciloscopio
- Multiplicadores de señales

El último de los aspectos a considerar previos a un ensayo es el aire del sistema neumático. Este sistema extrae el aire necesario para su funcionamiento de unas bombonas de aire, que tienen una capacidad de hasta unos 200 bar de presión. Para esta instalación se suele trabajar con valores comprendidos entre 80 y 130 bar. Para comprobar esta presión, debe iniciarse el software de la RCEM pues éste muestra el valor de la presión de las bombonas. En caso de que este valor esté por debajo de 80 bar, un compresor externo deberá ser encendido para enviar aire a las bombonas, elevando su presión.

3.3.2 PUESTA A PUNTO

Una vez se han encendido todos los elementos necesarios para la realización de un ensayo, algunos de estos deben configurarse de forma adecuada.

A través de tres ordenadores se controlan todos los aparatos e instrumentos de la instalación. En el primero de ellos, se lleva un histórico de los ensayos realizados y las condiciones de éstos. Cada vez que se realiza una repetición de un ensayo debe apuntarse en este histórico junto con sus condiciones. Asimismo, se inicializará el programa Matlab para un procesado *in situ* de los datos del ensayo, como se explicará más adelante. En este mismo ordenador se configura el dispositivo intensificador mediante su software. Los parámetros más relevantes para el correcto funcionamiento del intensificador son que el modo de *trigger* esté conectado y que la ganancia proporcionada sea de 600. El modo *trigger* permite enviarle al intensificador una señal para que se ponga a intensificar en un tiempo exacto determinado, en lugar de estar intensificando sin parar. Por último, los inyectores se coordinan mediante un software al que se le introducen los valores del *energizing time* visto anteriormente y se le envía la información al solenoide para que se produzca la inyección deseada.

Por otro lado, el uso del segundo ordenador es exclusivamente para el control de la RCEM mediante el software CAMAS anteriormente explicado. Debe inicializarse este software y comprobar que todos los sensores tanto de presión como de posición o temperatura muestran valores coherentes.

Por último, en el tercer ordenador se lleva a cabo el control de la bomba neumática del sistema de inyección y el software de la cámara rápida. Previo a la configuración de los parámetros de la bomba, esta debe ser alimentada con aire. En el CMT (Centro de Motores Térmicos) se dispone de un sistema capaz de enviar aire comprimido a sus múltiples instalaciones, por lo que para poner en marcha la bomba debe encenderse y abrir la válvula que conecta este sistema con la bomba. Una vez se han realizado estas operaciones, mediante el software de la bomba se puede introducir la presión objetivo y la bomba llevará a cabo tal tarea. Sin embargo, esta presión debe ser monitoreada cada cierto tiempo porque, además de por razones de seguridad, es muy complicado mantener una presión concreta estable y lo que se produce es una oscilación alrededor de la presión objetivo de unos 10 bar. Si, por cualquier motivo, la presión real se aleja demasiado del objetivo, deberá modificarse este valor para conseguir una respuesta de la bomba.

La configuración de la cámara, como se mencionó anteriormente, se realiza a través del software PFV, que permite realizar los cambios en los parámetros de la cámara. La configuración utilizada para la grabación de todos los ensayos del estudio es la siguiente:

CÁMARA	PHOTRON FASTCAM SA-Z
EXTENSIÓN DE LA IMAGEN	TIFF
ANCHO DE LA VENTANA	384 pixels
ALTO DE LA VENTANA	384 pixels
BIT DEPTH	12 bits
FRAMERATE	100000 fps
SHUTTERSPEED	9.037×10^6 s
NÚMERO DE FRAMES	1500
MODO	RandomR1500
NÚMERO DE REPETICIONES	1
COLOR BIT	12BIT GRAY

Tabla 13. Parámetros relevantes de la configuración de la cámara.

3.3.3 PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE UN ENSAYO

Una vez se tienen las condiciones descritas en el apartado anterior, se puede empezar con la realización del ensayo.

En primer lugar, es un buen hábito realizar una limpieza de la cámara de combustión previa a cualquier otra cosa. Para ello la presión de inyección debe ser mayor a unos 300 bar para contrarrestar la succión de la bomba, como se explicó en el apartado [3.2.4]. Con esta presión, se abre la válvula que conecta la cámara de combustión con la bomba y se enciende para llevar a cabo la limpieza. El concepto de limpieza en este estudio se entiende por un tiempo de encendido de la bomba de alrededor un minuto, tiempo en el que se estima que la cámara de combustión queda totalmente limpia.

Una vez se tiene la presión adecuada en la cámara, se pueden empezar a mover los pistones de la máquina. Como se ha mencionado en otros apartados, el llamado *Driving Gas* controla de forma indirecta la relación de compresión del ensayo y el régimen de giro equivalente. Es ahora cuando este *Driving Gas* debe ajustarse con gran precisión porque de él dependerá la parte de la compresión de la curva de presión que se obtendrá. Los valores óptimos de este parámetro que se han utilizado en este estudio rondan los 21 – 22 bar, pero antes de introducir ese valor, si es el primer ensayo del día se suele empezar por valores más pequeños por razones de seguridad. El *Driving Gas* se ve influenciado por muchos parámetros que cambian día a día, y un valor excesivo puede suponer un choque con la pre-cámara.

Antes del ensayo se realiza un arrastre en las mismas condiciones para realizar una última comprobación de que todo está funcionando correctamente. Si el arrastre proporciona la correcta relación de compresión se pasa a una última fase de comprobación previa al ensayo. Aquí, se comprueba el funcionamiento de toda la instrumentación (inyectores, cámara, sensores, intensificador...). Además, se configura el instante exacto de activación de la bujía, de la cámara y de la inyección en la pre-cámara, todos sincronizados con diferentes instantes de la carrera de compresión.

Una vez realizada la puesta a punto, se puede proceder a la realización del ensayo, dando la orden del comienzo del mismo a todos los elementos mediante el software de la RCEM. Aunque es un proceso fundamentalmente automático, en los primeros instantes la inyección principal se realiza de forma manual mediante un generador de pulsos (figura 47) para obtener un ambiente homogéneo.

Esta configuración se ha elegido así debido a que la realización de una única inyección no es posible mediante el inyector del que se dispone, por lo que se ha tenido que dividir la inyección de la mezcla principal en varias inyecciones. Las señales de estas inyecciones se ven representadas a tiempo real en el osciloscopio y puesto que el margen de error es muy pequeño (1 Hz), se debe tener un especial cuidado a la hora de realizar este paso, porque una inyección adicional podría suponer la aparición de *knock*, pudiendo dañar los elementos de la máquina.



Figura 47. Generador de pulsos.

Tras la preparación previa a la carrera de compresión rápida, esta empieza su recorrido y al pasar por los diversos puntos de consigna (posición medida mediante la regla magnética) se van disparando los diversos *triggers* ya mencionados. Así, la inyección en la pre-cámara se da en un cierto instante de la carrera de compresión para corregir el dosado relativo en este volumen consiguiendo una mezcla cercana a la condición estequiométrica. Por último, lo mismo ocurre con la bujía, que al activarse provoca el inicio de la combustión. El osciloscopio está configurado para que aparezca tanto la señal de presión como la señal de la bujía representadas, por lo que se puede determinar al instante si el ensayo es *a priori* válido o se ha producido un *misfire*.

3.3.4 RECOPIACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

El osciloscopio es el encargado de la captación de los datos del ensayo. Este dispositivo deja de recopilar información una vez ha finalizado el ensayo, y crea un archivo tipo .WDF con los datos de los sensores conectados a él. Las señales adquiridas son:

- Presión de la cámara principal
- Presión de la pre-cámara
- Corriente del circuito primario de la bujía
- Presión en la inyección
- Señal A de posición
- Señal B de posición
- Señal o *Trigger* de la inyección en pre-cámara
- Señal de la inyección en cámara principal

El siguiente paso es el guardado de todos estos datos. Tanto en el osciloscopio como en el software de la cámara rápida debe seleccionarse la opción de guardado. El ensayo y sus condiciones se anotan en un archivo Excel donde se lleva el histórico de todo el estudio y se procede a la realización de las acciones comentadas en el apartado [3.3.2] (limpieza y arrastre) para la puesta a punto del siguiente ensayo.

Para el posterior procesado de los datos obtenidos, necesitan ser convertidos en archivos que el software de procesado, en este caso Matlab, sea capaz de entender. Para ello, mediante un código se transforma el archivo .WDF obtenido de la Yokogawa en dos archivos, uno tipo .WVF y otro tipo .HDR.

Una vez se tienen estos archivos, y mientras se realizan las operaciones de limpieza y arrastre, el procedimiento a seguir es realizar un procesado *in situ* del ensayo para obtener la curva de presión. Como se ha comentado, mediante Matlab se consiguen procesar los archivos creados mediante un código creado específicamente para este fin, del que se obtiene toda la información necesaria para el estudio. Esta acción se realiza casi al instante de la finalización del ensayo con el fin de mostrar la curva de presión para comprobar que se ha obtenido una relación de compresión adecuada. Si la curva de presión de ese ensayo difiere demasiado de las curvas de presión con las que se quiere comparar, deberá repetirse esa condición hasta que dichas curvas sean muy similares.

Así, se asegura que cada repetición de cada ensayo realizado posee una relación de compresión adecuada y todo puede ser comparado de forma correcta para no extraer conclusiones erróneas.

3.3.5 PROCESADO DE LOS DATOS

Aunque el código encargado de realizar el post-procesado de los datos sea capaz de extraer muchísima información del ensayo, en este estudio los datos más relevantes serán la presión, la penetración de los chorros y su velocidad.

Para obtener las curvas de presión que se muestran en el capítulo 4 de resultados, como se ha ido adelantando, se utiliza un código ideado en el CMT para tal fin. Mediante Matlab, se puede graficar el desarrollo de la presión a lo largo del ensayo para así poder analizarla.

Por otra parte, la obtención de la penetración de los chorros y su velocidad se realiza también mediante el programa Matlab pero el procesado de estos es más complejo. En primer lugar, los archivos a procesar se colocan en una carpeta en la que se realizará todo el proceso. Estos archivos son los que se obtienen directamente del guardado a través del software de la cámara, y son del tipo .cih y .tif. El departamento de técnicas ópticas del CMT desarrolló un conjunto de códigos que, en combinación, son capaces de procesar este tipo de películas propias del estudio de la combustión, para obtener todo tipo de resultados. Estos códigos fueron creados con la versión de Matlab 2014 – A, por lo que esta será la versión del programa a utilizar. Tras cargar las herramientas del CMT, el primer paso es la lectura de las características de la cámara y de la película creada a través de un primer código. El siguiente, es capaz de crear una imagen media del rango de la película que se desee. Puesto que se desea conocer la penetración del chorro, el rango de la película seleccionado será aquel en el que los chorros se vean desde su inicio hasta su llegada a la pared. Por tanto, se determinó un rango desde 1600 a 1900 μs para la creación de esta imagen.

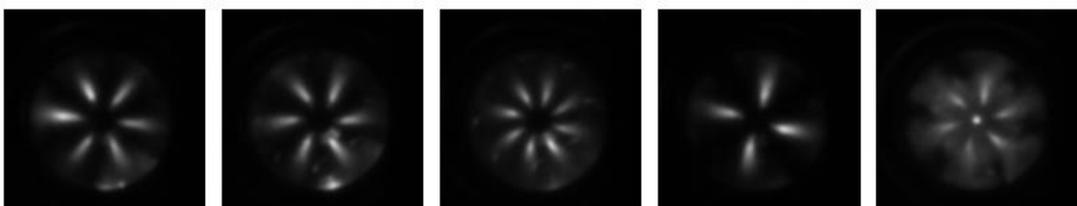


Figura 48. Imagen media de todas las pre-cámaras, empezando por la pre-cámara 1 de izquierda a derecha.

La función que se utiliza a continuación es muy importante, pues esta abre una ventana entera dedicada exclusivamente a la definición de la geometría de los chorros que salen desde la pre-cámara hacia la cámara principal.

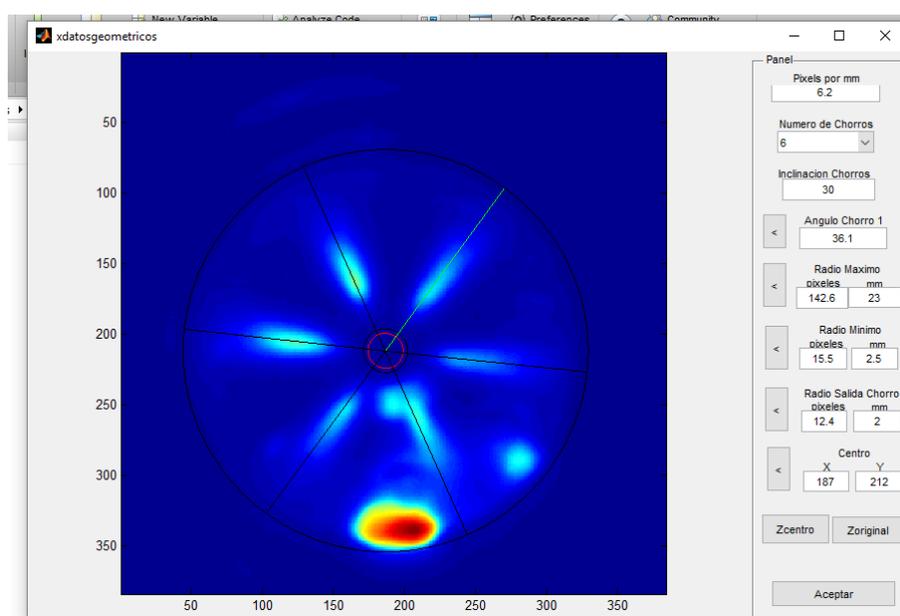


Figura 49. Ventana de configuración de la geometría.

Aquí, deben introducirse diversos valores para la correcta definición de la geometría del problema para su óptimo procesado. A continuación, se muestran las características que se han utilizado para cada pre-cámara.

PRECÁMARA	1	2	3	4	5
NºCHORROS	6	6	8	4	6
INCLINACIÓN	30				
CENTRO	X = 187 Y= 212				
ÁNGULOCHORRO1	36.1°	29°	15.5°	15.5°	17°
RADIO MÁXIMO	23 mm				
RADIO MÍNIMO	2.5 mm				
RADIOSALIDACHORRO	2 mm				

Tabla 14. Parámetros geométricos de cada pre-cámara introducidos en la ventana correspondiente.

En última instancia, se obtiene sobre la imagen media el contorno definido en esta ventana y sobre el que se basará el procesado de la película.

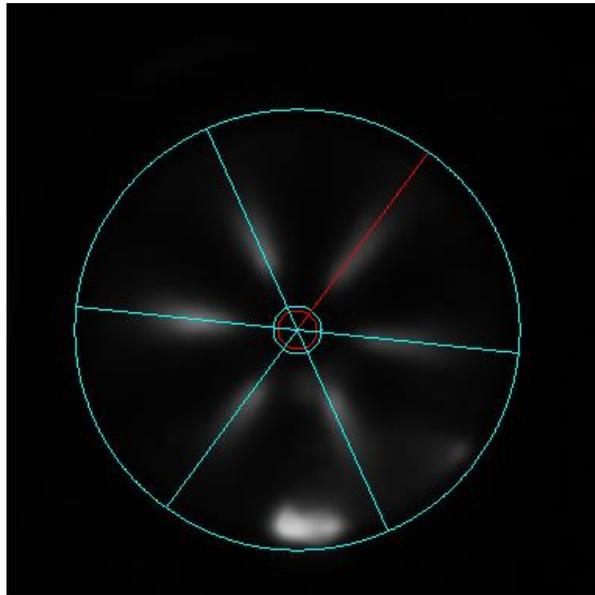


Figura 50. Geometría definida sobre la imagen media.

A continuación, se utiliza la función específica para procesar esta imagen, y esta es muy importante pues si se realiza de forma incorrecta, llevará a resultados incorrectos. Se abre un código con el que el usuario debe interactuar para introducir ciertos parámetros. Los más importantes son el parámetro THS y el parámetro MINTHS. Con la modificación del primero, se indica el umbral (en porcentaje) del rango dinámico del *background* corregido de la imagen, mientras que el segundo tiene que ver con el mínimo umbral absoluto. Con la variación de estos dos valores se modifica la captación del nivel de luminosidad producido por los chorros. Con un óptimo valor del parámetro MINTHS ya fijado del 2%, se muestra la variación que comporta la modificación de este parámetro:

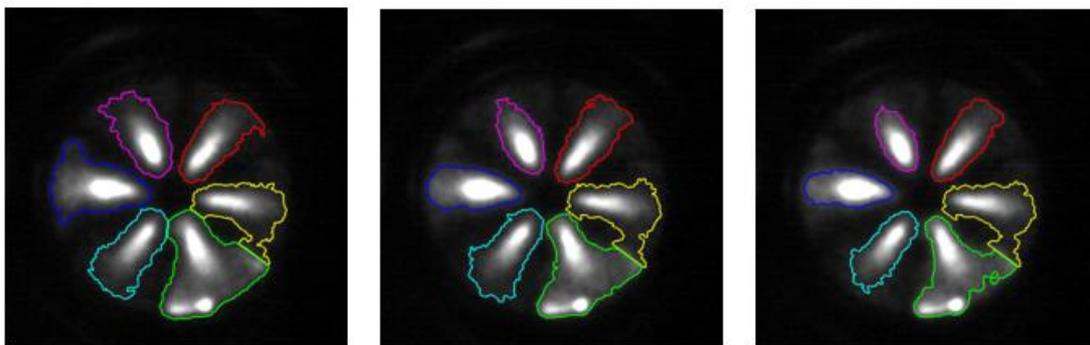


Figura 51. Influencia del parámetro THS en la captación de la combustión. De izquierda a derecha: 5%, 7.5% y 10%.

Si se analizan las imágenes se observa que con un valor del 5% se capta más emisión de luz que en los otros casos, en los que el contorno se dibuja para un umbral en la intensidad de la luz demasiado alto, dejando información por recoger. Sin embargo, se ha visto que un valor por debajo del 5% capta intensidades de luz muy pequeñas que no representan la dinámica del fenómeno. Por tanto, el valor elegido es del 5% porque supone un equilibrio entre ambos extremos. Cabe aclarar que este valor tiene una influencia elevada a la hora de estudiar la penetración de los chorros pues de los contornos dependerá este valor recogido por el código, y si no se realiza correctamente, puede llevar a conclusiones erróneas.

Al iniciar la función del procesado de datos, esta muestra cada imagen generada con el contorno de cada chorro, y crea una carpeta donde guarda todas las imágenes. A esto, le siguen diversas funciones cuyo objetivo es la organización de los datos obtenidos. Por último, se cargan los datos relevantes en el espacio de Matlab para su análisis.

3.3.6 METODOLOGÍA GENERAL DE REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

Como se explicó en apartados anteriores, en este estudio se ha trabajado con dosados fundamentalmente pobres. Así, en cada pre-cámara se ha realizado un barrido de ensayos con dos tipos de condiciones:

	Fr PRE-CÁMARA	Fr CÁMARA PRINCIPAL
CONDICIÓN 1	1,1	0,5
CONDICIÓN 2	1,1	0,3

Tabla 15. Condiciones del estudio.

El barrido de ensayos realizado en cada pre-cámara comprende un mínimo de 6 repeticiones por cada condición, es decir, 6 repeticiones de la condición 1 para la pre-cámara 1 y 6 repeticiones de la condición 2 para la misma pre-cámara, suponiendo un total de 12 ensayos por pre-cámara. En el estudio global, por tanto, se han realizado 60 ensayos. En la medida de lo posible se ha intentado realizar todo el barrido de cada pre-cámara en el mismo día para disminuir al máximo las posibles dispersiones que se puedan producir entre días diferentes.

A continuación, se muestran los parámetros más relevantes utilizados en la metodología del estudio.

Presión de inyección	1000 bar*
Carrera del pistón	120 mm
Presión inicial del ciclo	1.5 bar
Presión de Driving Gas	20 – 22 bar
Temperatura inicial	348 K
Inyección principal (MC)	33.1 mg condición1 / 19.9 mg condición2
Inyección auxiliar (PC)	1.9 mg condición 1 / 2.5 mg condición 2
Energizing Time	4200x2 ms (Fr = 0.5) / 2410x2 (Fr = 0.3)*
Posición de salto de la chispa	103 mm
Ganancia relativa del intensificador	600

Tabla 16. Parámetros relevantes en la metodología de los ensayos.

COMBUSTIBLE	ISO-OCTANO O 2,2,4 - TRIMETILPENTANO
FÓRMULA MOLECULAR	C ₈ H ₁₈
DENSIDAD	690 kg/m ³
MASA MOLAR	114,22 g/mol
PUNTO DE FUSIÓN	165.77 K (P=Patm)
PUNTO DE INFLAMABILIDAD	277.6 K (P=Patm)

Tabla 17. Características del combustible utilizado

*Cabe aclarar que en el caso de la pre-cámara 5, se tuvo que realizar el barrido con una presión de inyección de 500 bar en lugar de 1000 bar, puesto que con esta última presión la velocidad de inyección del combustible era muy elevada y la mayor parte de la mezcla salía por el orificio axial, sin producirse una combustión. Por tanto, la gráfica para la comparación de la primera y la quinta pre-cámara, está realizada con 500 bar de presión. Al producirse este cambio, deben reajustarse parámetros como el *energizing time* o la masa a inyectar para no introducir ningún cambio en el sistema y poder realizar correctamente las comparaciones.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

En esta sección se presentarán los resultados obtenidos tras la realización del estudio.

ÍNDICE DEL APARTADO

CAPÍTULO 4: RESULTADOS	81
4.1 ANÁLISIS DE LAS CURVAS DE PRESIÓN	82
4.1.1 ANÁLISIS INICIAL	82
4.1.2 RESULTADOS: CURVAS DE PRESIÓN	84
4.2 ANÁLISIS DE LA PENETRACIÓN DE CHORROS	94
4.2.1 ANÁLISIS INICIAL	94
4.2.2 RESULTADOS: CURVAS DE PENETRACIÓN	97

Para la correcta comprensión de las gráficas obtenidas, a cada pre-cámara se le ha asignado un tono de colores:

PRE-CÁMARA	TONO DE COLORES
1	Azules
2	Verdes
3	Violetas
4	Marrones
5	Rojos

Tabla 18. Colores asignados a cada pre-cámara.

4.1 ANÁLISIS DE LAS CURVAS DE PRESIÓN

Para la presentación de los resultados de las curvas de presión, se muestra en las gráficas dos curvas de cada pre-cámara de todas las realizadas por cada condición, con el objetivo de no saturar la gráfica y facilitar su comprensión. Estas dos curvas se corresponden a las repeticiones con valores extremos (máximo y mínimo) de crecimiento de presión en la pre-cámara durante la fase de combustión en la misma.

De este modo, todas las repeticiones realizadas para cada condición se encontrarían dentro de la zona marcada por estas dos curvas extremas. Por tanto, se puede ver como un indicador de la repetitividad de la combustión en la pre-cámara durante los ensayos.

4.1.1 ANÁLISIS INICIAL

En este apartado se va a realizar un análisis general de la curva de presión de la tecnología TJI tomando como referencia la pre-cámara 1. Antes de nada, se dispone de la siguiente tabla que explica las abreviaturas y conceptos que se van a utilizar en este apartado:

CONCEPTO	ABREVIATURA
PRESIÓN EN PRE-CÁMARA	PC
PRESIÓN EN CÁMARA PRINCIPAL	MC
CURVA MÁXIMA	Max
CURVA MÍNIMA	Min
PRE-CÁMARA	prec

Tabla 19. Abreviaturas utilizadas en este apartado.

En la siguiente figura se representa la curva de presión de un ciclo con combustión de referencia:

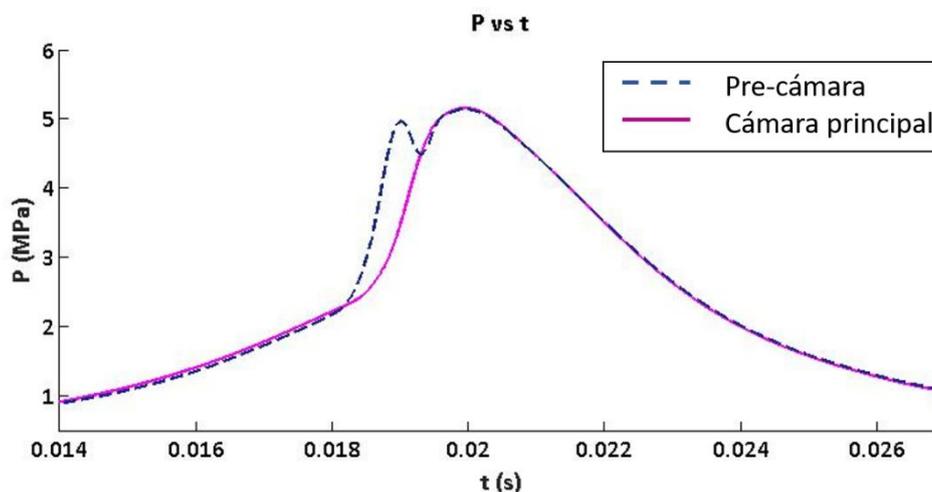


Figura 52. Curva de presión de un ensayo con combustión de referencia.

Si empezamos el análisis en el orden cronológico de sucesos, vemos que la curva de compresión de la pre-cámara va durante toda esta fase por debajo de la cámara principal, es decir, se alcanzan presiones más elevadas en la cámara principal durante la compresión. Esto es debido a la pérdida de carga asociada al paso del flujo por los orificios. Al realizar una compresión relativamente rápida, la velocidad local en estos orificios es muy alta. Al generarse la combustión inicial, la presión en la pre-cámara aumenta muy rápidamente debido a su pequeño volumen. En cierto punto de la combustión de la pre-cámara, los chorros turbulentos entran en la cámara principal a través de los orificios e interactúan con la mezcla de este volumen. Cada chorro supondrá un punto de encendido en esta cámara que ayudará a una combustión más homogénea.

Tras el máximo valor de presión alcanzado con la combustión principal, empieza la fase de expansión. En esta fase, al contrario que en la fase de compresión, la curva de la pre-cámara va por encima de la cámara principal. Como en el caso anterior, los orificios originan una pérdida de carga que se ve reflejada en este suceso. Esta distribución de presiones referente a la pre-cámara y cámara principal, generalmente se repetirá para cada ensayo realizado, por lo que no se reiterará este hecho en los análisis posteriores.

4.1.2 RESULTADOS: CURVAS DE PRESIÓN

Como se dijo en apartados anteriores, se van a comparar todas las pre-cámaras con la pre-cámara 1 tomada como referencia, analizando las curvas de presión para ver lo que sucede en la combustión variando la geometría de la pre-cámara.

PRE-CÁMARA 1

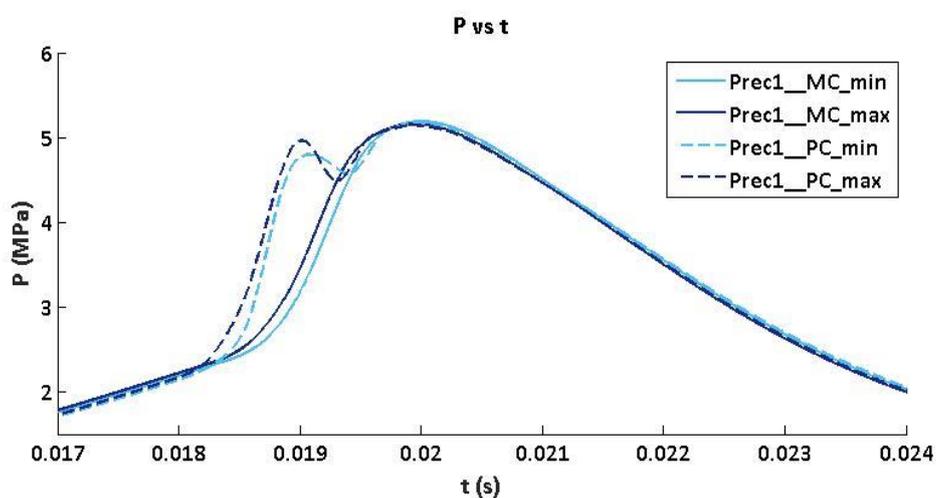


Figura 53. Curva de presión pre-cámara 1. $Fr_{MC} = 0,5$.

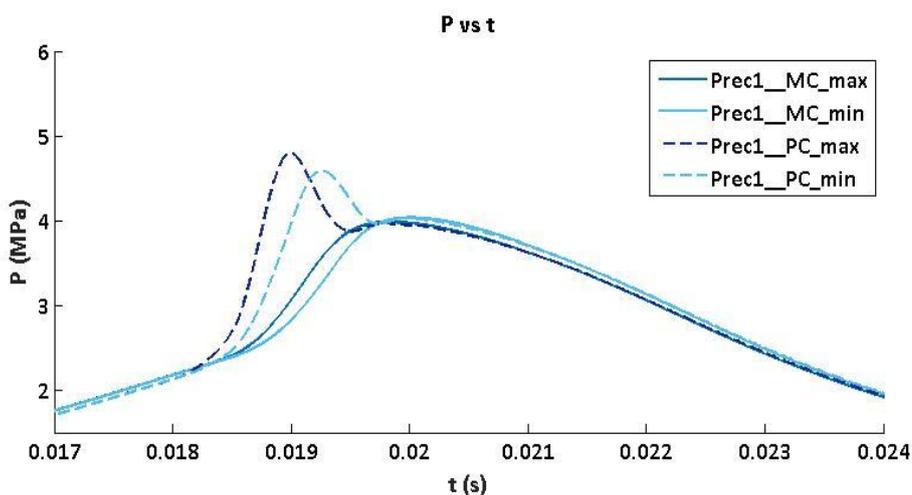


Figura 54. Curva de presión pre-cámara 1. $Fr_{MC} = 0,3$.

Previo al análisis comparativo entre pre-cámaras, se puede observar una diferencia muy clara entre las curvas de presión de una misma pre-cámara en función del dosado.

En ambas imágenes se puede observar como la presión de la pre-cámara alcanza valores muy parecidos. Esto se debe a la corrección del dosado que se realiza mediante la inyección auxiliar, consiguiendo la misma cantidad de combustible en la pre-cámara. Sin embargo, como es lógico, no se alcanzan los mismos valores de presión de pico en la cámara principal debido a la menor cantidad de combustible.

No obstante, la diferencia entre ambas condiciones es generalmente de unos 10 bar, lo que supone una combustión más que aceptable trabajando con mezclas tan pobres. Por otro lado, se observa muy poca diferencia entre ambas curvas graficadas (máxima y mínima) en cuanto a sus valores de presión, lo que indica que la repetitividad del sistema es muy alta.

Se pasará ahora a realizar el análisis de las mismas condiciones de dosado (y del resto de factores) pero variando la geometría de la pre-cámara.

PRE-CÁMARA 1 vs PRE-CÁMARA 2

CONDICIÓN 1: $Fr_{pre-cámara} = 1.1$ / $Fr_{cámara\ principal} = 0.5$

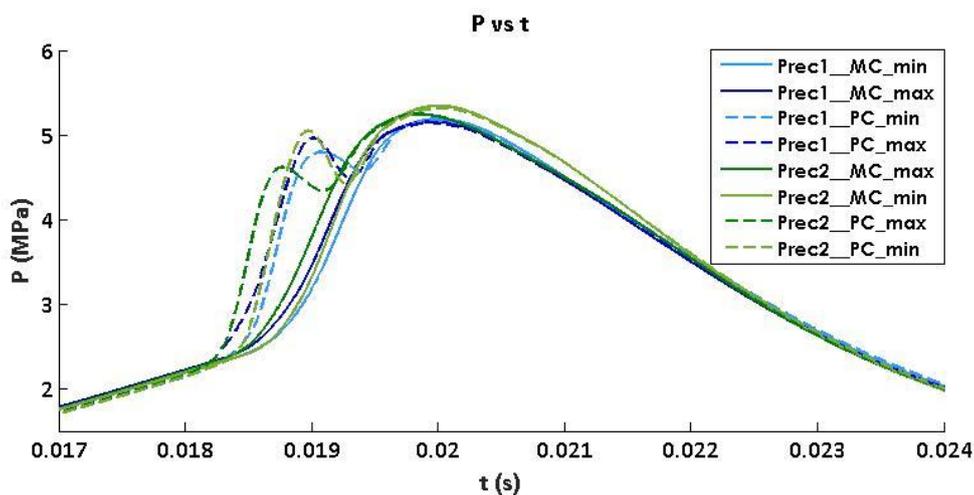


Figura 55. Curva de presión pre-cámaras 1 y 2. $Fr_{MC} = 0.5$.

La fase de la compresión en ambas pre-cámaras es exactamente igual, lo que implica una misma relación de compresión. Esto es gracias al procesado *in situ* explicado en el apartado [3.3.3], y se repite en prácticamente todos los ensayos, por lo que no se mencionará más este suceso de ahora en adelante.

A igualdad en el punto de salto de la chispa de la bujía, no parece que se produzca una diferencia significativa en el punto de inicio de la combustión de la pre-cámara para ambas geometrías. Sin embargo, se observa un incremento más rápido de la presión en la pre-cámara 2 lo que hace que todo el fenómeno que ocurre dentro de la pre-cámara se produzca antes que en la primera.

Esto indica que el desfase de 3 mm que los orificios tienen entre ellos en la segunda pre-cámara puede estar ayudando a la mezcla en la pre-cámara generando un movimiento de *swirl* en su interior, cuando el combustible se encuentra entrando en este volumen. En cuanto al valor máximo alcanzado en las pre-cámaras, no se observa ninguna diferencia significativa para la misma condición.

Al realizar el análisis del valor de pico de presión, se observa que la pre-cámara 2 obtiene valores más elevados, con una diferencia de alrededor 2 bar de presión, lo que supone una mejoría con respecto a la primera pre-cámara. El *swirl* generado por el desfase de los orificios provoca que los chorros entren a la cámara principal de una forma tal que se mejora la distribución de los radicales activos, generándose una combustión más homogénea. Además, se sigue quemando en los primeros instantes de la expansión lo cual indica una combustión óptima.

En una primera aproximación, parece que la repetitividad se ve afectada por el desfase de los orificios, porque se observa una mayor diferencia entre las curvas graficadas de la pre-cámara 2. Esto puede estar indicando que el movimiento de *swirl* que se genera en esta geometría varía considerablemente ciclo a ciclo.

CONDICIÓN 2: $Fr_{\text{pre-cámara}} = 1.1$ / $Fr_{\text{cámara principal}} = 0.3$

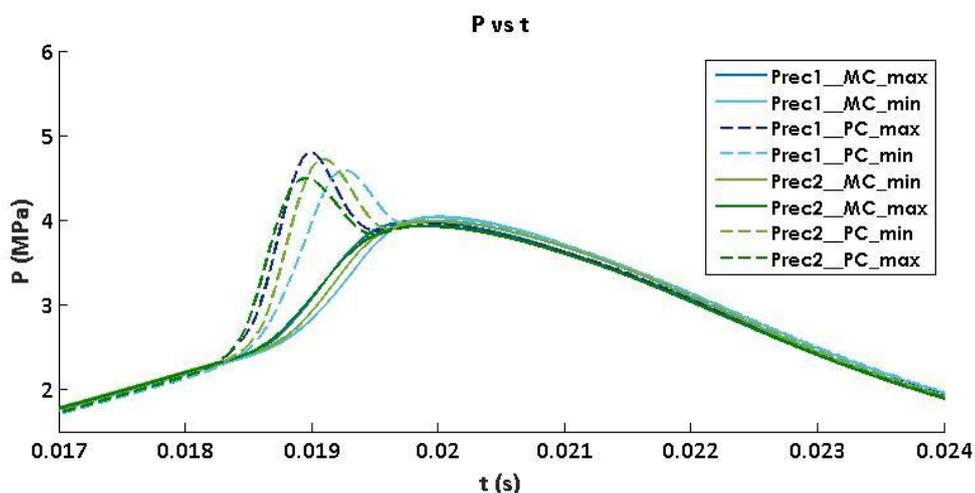


Figura 56. Curva de presión pre-cámaras 1 y 2. $Fr_{MC} = 0.3$

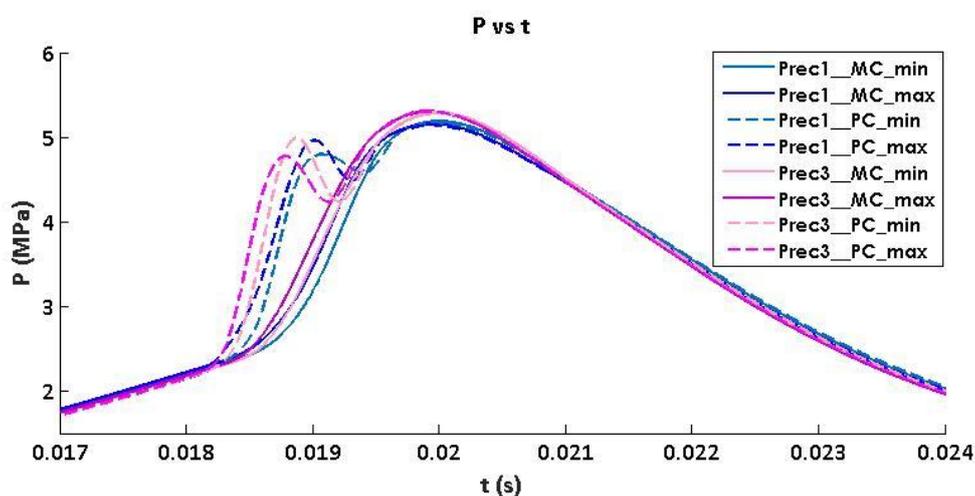
Al igual que en la condición anterior, no se produce ninguna diferencia en el punto de inicio de la combustión, aunque ahora la mayor rapidez de la combustión en la pre-cámara 2 es menos evidente. En esta condición la diferencia de 2 bar en la presión de pico se pierde, todas las curvas alcanzan valores muy parecidos de alrededor 40 bar.

El proceso global parece desarrollarse a la misma velocidad que en la condición anterior para todos los casos, aunque la forma más achatada de la curva indica que en la fase de expansión la combustión podría no haber finalizado, afectando así a la pendiente de en esta fase. Por otra parte, se observa una notable mejoría en la repetitividad de la pre-cámara 2 lo que puede deberse a la menor cantidad de combustible presente.

En conclusión, la pre-cámara 2, gracias al *swirl*, obtiene mejores resultados en la presión de pico generales mientras el resto de parámetros se mantienen con valores parecidos para ambas pre-cámaras.

PRE-CÁMARA 1 vs PRE-CÁMARA 3

CONDICIÓN 1: $Fr_{pre-cámara} = 1.1$ / $Fr_{cámara\ principal} = 0.5$



En esta comparación se puede apreciar un pequeño retraso en el inicio de la combustión de la pre-cámara 1 respecto a la tercera. Esto puede deberse a que el mayor número de orificios genere una mezcla más homogénea cerca de la bujía, produciéndose el encendido con apenas retraso tras saltar la chispa.

En ambas curvas extremas se observa de forma clara como la combustión en la pre-cámara 3 posee una mayor pendiente, por tanto, se produce de forma más rápida. Los valores alcanzados son parecidos, a veces con la pre-cámara 3 por encima y a veces, al contrario, lo que indica una cierta variabilidad asociada.

En cuanto a lo que ocurre en la cámara principal, al igual que en la pre-cámara, el fenómeno de la combustión se desarrolla de forma más rápida, y además, llega a valores también más altos, produciéndose una diferencia con la pre-cámara 1 de unos 2-3 bar. Además, se ve claramente como las curvas de la pre-cámara 3 van por debajo de la pre-cámara 1 en la fase de expansión, por lo que no se produce ninguna combustión tardía o una combustión lenta que penalice la obtención de trabajo.

CONDICIÓN 2: Fr pre-cámara = 1.1 / Fr cámara principal = 0.3

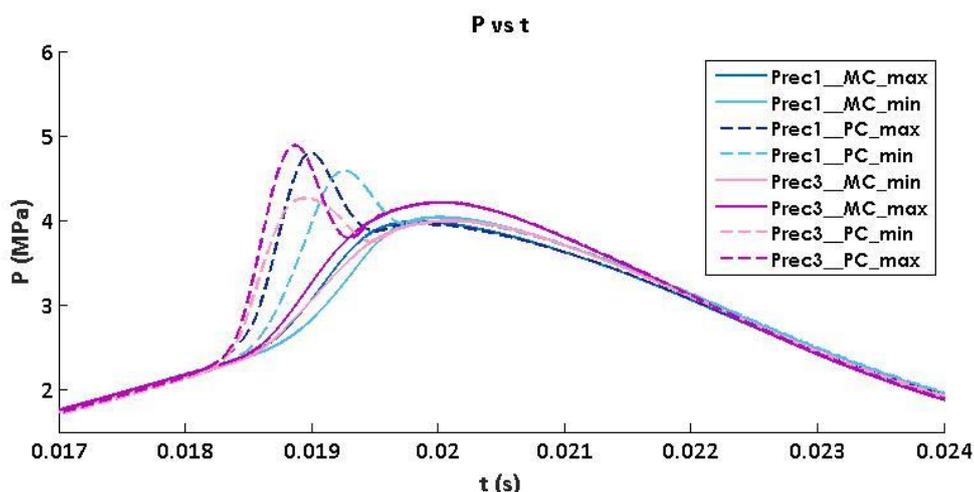


Figura 58. Curva de presión pre-cámaras 1 y 3. $Fr_{MC} = 0.3$

En esta condición el avance en el inicio de la combustión por parte de la pre-cámara 3 se hace menos claro, pues, aunque en las curvas mínimas suceda, en las curvas máximas no es el caso. Sin embargo, se hace aún más notable la diferencia de rapidez en el desarrollo de la combustión en la pre-cámara 3, siendo mucho mayor a la primera.

En cuanto al comportamiento en cámara principal, ocurren los mismos fenómenos explicados en la condición anterior, sin ninguna novedad.

En conclusión, con la pre-cámara 3 se alcanzan valores superiores de presión de pico, se desarrolla de forma más rápida la combustión en la pre-cámara, y el vaciado en la fase de expansión se mejora.

PRE-CÁMARA 1 vs PRE-CÁMARA 4

CONDICIÓN 1: Fr pre-cámara = 1.1 / Fr cámara principal = 0.5

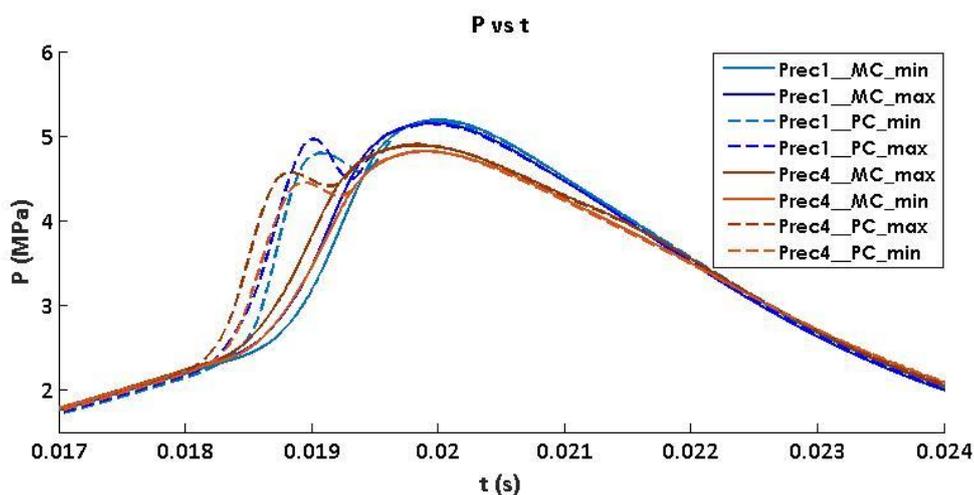


Figura 59. Curva de presión pre-cámaras 1 y 4. $Fr_{MC} = 0.5$.

El inicio de la combustión en la pre-cámara 4 parece adelantarse con respecto a la pre-cámara 1, sin embargo, la velocidad en el desarrollo del fenómeno es parecida para ambas pre-cámaras. Además, en esta pre-cámara de 4 orificios se alcanzan valores menores de presión en la pre-cámara de hasta 5 bar de diferencia.

En cuanto a la combustión en cámara principal, ocurre prácticamente lo mismo. Se observa un avance en el inicio de la combustión, pero su velocidad es la misma con respecto a la pre-cámara 1. Además, en este volumen también se alcanzan presiones inferiores en ambas curvas extremas para la pre-cámara 4. Esto puede ser debido principalmente por dos motivos: al tener un diámetro mayor de los orificios, la velocidad de los chorros se ve penalizada, y por tanto entran con una menor turbulencia a la cámara principal, y además, la menor presión en pre-cámara también afectará la correcta distribución de los chorros en la cámara principal. Por último, se observa un comportamiento diferente a la pre-cámara 1 en la fase de expansión. La curva de esta fase es mucho más suave e incluso se producen pequeñas irregularidades, llegando a ir por encima de la curva de expansión de la primera pre-cámara. Este hecho puede ser debido a que la combustión que se produce es muy lenta, o tras la primera combustión, se producen otras en esta fase relativas a la mezcla que no ha conseguido quemarse.

CONDICIÓN 2: Fr pre-cámara = 1.1 / Fr cámara principal = 0.3

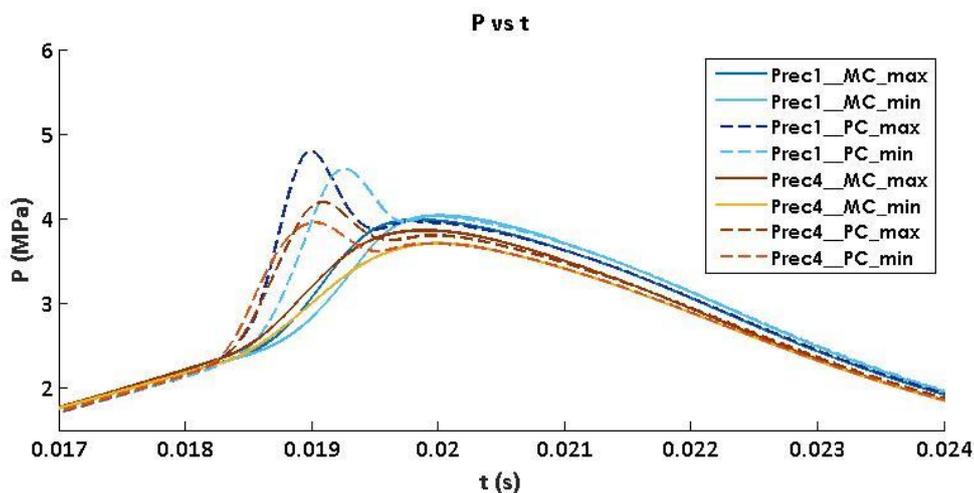


Figura 60. Curva de presión pre-cámaras 1 y 4. $Fr_{MC} = 0.3$.

En esta condición se hace más evidente, si cabe, la diferencia entre los valores de pico en las pre-cámaras. Como se puede observar, la pre-cámara 4 llega a estar a unos 7 bar de diferencia con respecto a la primera, lo que indica un peor quemado de la mezcla en este volumen.

En la cámara principal se siguen alcanzando valores inferiores en la segunda pre-cámara, aunque también se inicie antes la combustión. En la fase de expansión, al contrario que en la condición anterior, se observa un comportamiento análogo de ambas curvas, prácticamente con la misma pendiente. Por último, tanto en la condición anterior como en esta, las curvas extremas poseen valores cercanos, por lo que indica que la repetitividad del sistema es óptima.

En conclusión, la pre-cámara 4 supone un peor sistema debido a una penalización en la turbulencia, alcanzando presiones menores e incluso quemando de manera ineficiente.

PRE-CÁMARA 1 vs PRE-CÁMARA 5

CONDICIÓN 1: $Fr_{pre-cámara} = 1.1$ / $Fr_{cámara\ principal} = 0.5$

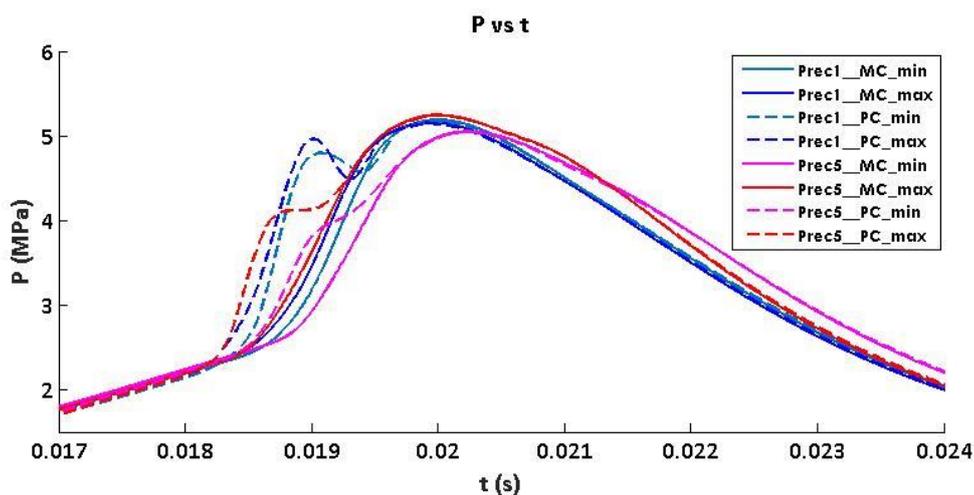


Figura 61. Curva de presión pre-cámaras 1 y 5. $Fr_{MC} = 0.5$.

Hasta ahora, en todas las pre-cámaras se había observado una misma forma de la curva de presión producida en este volumen. Sin embargo, se observa que en la pre-cámara 5 esta curva se deforma, no realizando la fase de descenso progresivo de la presión hasta igualarse con la curva de la cámara principal. En su lugar, se observa cómo tras una primera fase de desarrollo análogo a los casos anteriores de la combustión, la curva realiza un pequeño valle y a partir de ahí vuelve a subir en presión hasta igualarse con la curva. El orificio central provoca que parte de la combustión que se genera en el interior de la pre-cámara, escape prematuramente a la cámara principal con facilidad, con lo que la presión en la pre-cámara disminuye. Los valores de presión alcanzados en este volumen son muy inferiores debido a este hecho, llegando a tener una diferencia de casi 10 bar con respecto a la primera pre-cámara. Por último, se observa una gran diferencia entre las curvas extremas de la pre-cámara 5, lo que indica una gran dispersión asociada a este sistema.

En cuanto a la cámara principal, lo más llamativo es la gran diferencia entre las curvas extremas de la quinta pre-cámara, lo que ratifica que este sistema penaliza la repetitividad de los ensayos. Además, hay una diferencia considerable entre los valores de pico de ambas curvas extremas.

En cuanto a los valores de pico entre pre-cámara 1 y 5, estos no son muy diferentes, llegando a presiones de alrededor 50 bar. Sin embargo, la mayor diferencia se produce en la fase de expansión, pues se observan grandes irregularidades en la curva de esta fase correspondientes a la pre-cámara 5. Este comportamiento inusual es debido a una combustión muy lenta que aún no ha finalizado en la fase de expansión, o a combustiones de residuales posteriores a la combustión principal. Esto se debe a un autoencendido de la mezcla durante la carrera de expansión originado por el mayor calentamiento de la zona de mezcla aire-combustible en la parte central de la cámara. En las siguientes recogidas instantáneas después de la finalización de la combustión en la cámara principal se puede observar este fenómeno.

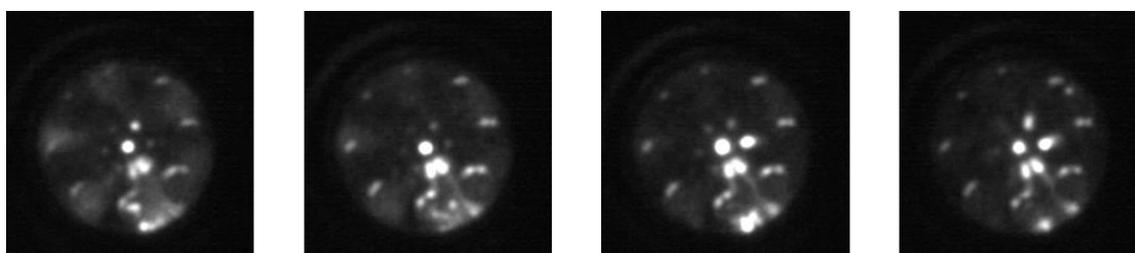


Figura 62. Autoencendido en la zona central de la cámara en la fase de expansión.

CONDICIÓN 2: Fr pre-cámara: 1.1 / Fr cámara principal: 0.3

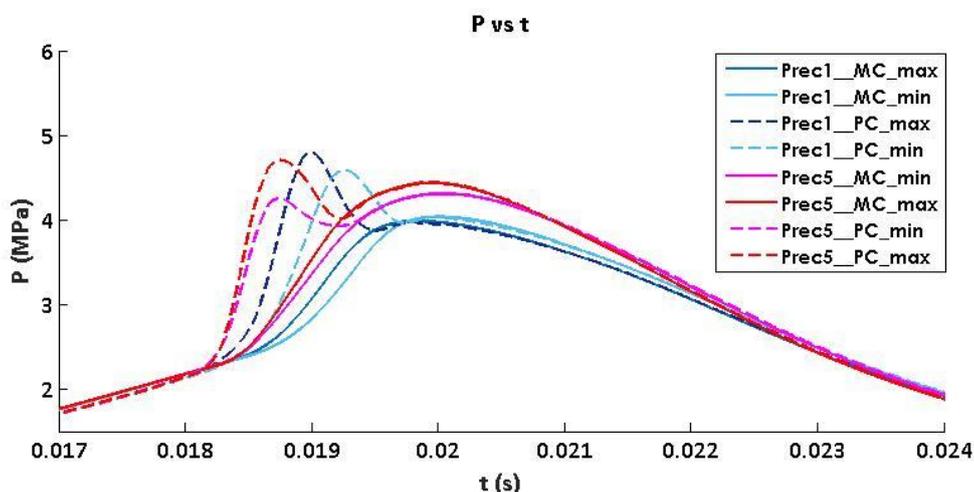


Figura 63. Curva de presión pre-cámaras 1 y 5. Fr_{MC} = 0.3.

En esta condición de mezcla más pobre, se puede observar un comportamiento general más regular de la pre-cámara 5. El inicio de la combustión se produce con una considerable anterioridad con respecto a la primera pre-cámara, y además, apenas hay variación en este, lo que favorece la repetitividad.

La curva ya no presenta una forma irregular, si no que sigue la forma convencional del desarrollo de la presión en pre-cámara, y además, se alcanzan los mismos valores de presión para ambas pre-cámaras, lo que supone una mejora en la combustión de este volumen para la quinta pre-cámara.

La mayor diferencia se observa en la cámara principal. El inicio de la combustión principal se produce antes que en la primera pre-cámara, lo cual es coherente con la posición del nuevo orificio, que origina un chorro que puede favorecer la distribución del encendido en la cámara principal. Este hecho supone que, aunque la velocidad en la combustión sea parecida, se alcancen mayores valores de presión con este sistema, de hasta 5 bar de diferencia en la presión de pico. En la fase de expansión no se observan diferencias notables.

En conclusión, la pre-cámara 5 supone un sistema ineficiente y muy irregular para un dosado de 0,5. Sin embargo, su comportamiento en un dosado de 0.3 es mucho más eficiente y regular, alcanzando mayores valores de presión de pico.

En resumen, tanto la pre-cámara 2 como la 3 consiguen mejorar las características del sistema de forma análoga, pues alcanzan valores de presión superiores, lo que se debe fundamentalmente al mayor movimiento de *swirl*. Sin embargo, la pre-cámara 4 obtiene los peores resultados en cuanto a presiones de pico alcanzadas debido fundamentalmente a una menor turbulencia causada por un mayor diámetro de los chorros. Por último, la quinta pre-cámara mostró un comportamiento ineficaz para un dosado de 0.5, sin embargo, supone la mejor opción para el dosado más pobre de 0.3, pues gracias al chorro generado por el orificio axial, se produce una mejora en la distribución volumétrica de los chorros que origina presiones considerablemente superiores al resto de geometrías.

4.2 ANÁLISIS DE LA PENETRACIÓN DE CHORROS

En el presente apartado se presentan los resultados obtenidos en cuanto a la penetración de los chorros de la pre-cámara.

En la siguiente tabla se presenta la simbología utilizada para representar en las gráficas el número de chorro asociado.

CHORRO	SÍMBOLO
1	Ninguno (línea limpia)
2	0
3	*
4	.
5	∇
6	□
7	+
8	x

Tabla 20. Simbología utilizada para las gráficas de penetración.

4.2.1 ANÁLISIS INICIAL

Antes de empezar el análisis inicial de la penetración, se muestran las imágenes de las pre-cámaras junto con el que se considera chorro de referencia para cada una de ellas.

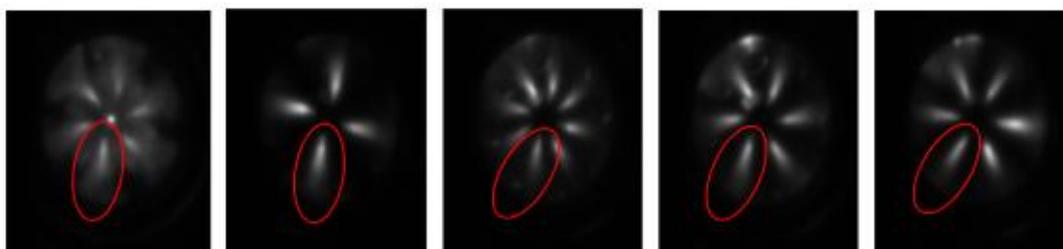


Figura 64. Pre-cámaras con chorro 1 señalado.

Con el primer chorro (1) identificado, es fácil identificar el resto. En este estudio se va siguiendo un orden numérico de los chorros en el sentido de las agujas del reloj, de tal forma que el chorro que se encuentra a la derecha del primero se considera el segundo, y así sucesivamente.

Asimismo, se recuerda la distribución que siguen la bujía y el inyector auxiliar dentro de la pre-cámara.

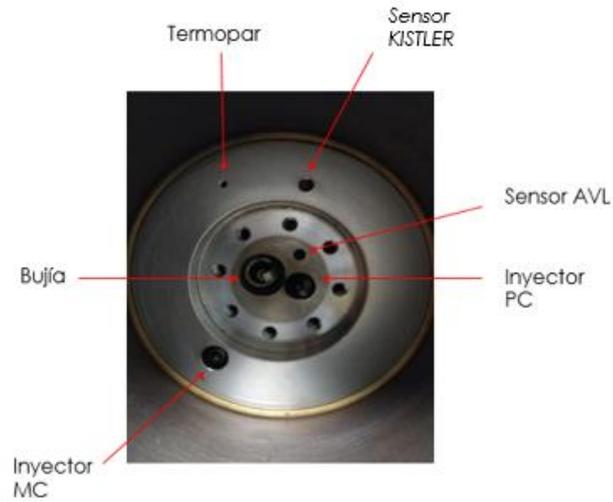


Figura 65. Cámara de combustión y sus elementos.

Por otro lado, se presentan algunos fragmentos del proceso general de la combustión en las pre-cámaras 1 y 5 (en el apéndice 1 se pueden encontrar todas).

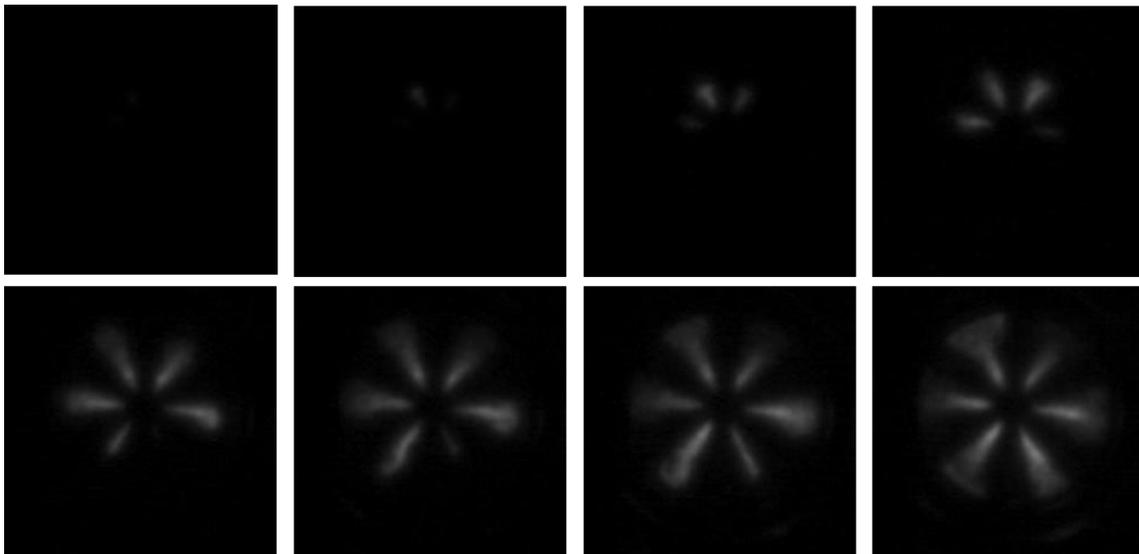


Figura 66. Visualización del fenómeno de la combustión. Pre-cámara 1

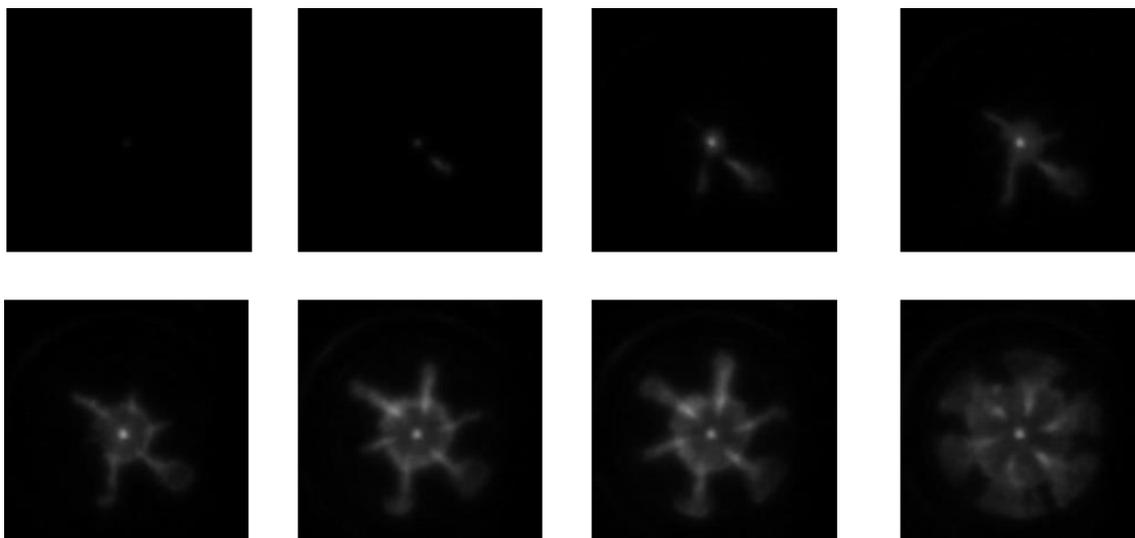


Figura 67. Visualización del fenómeno de la combustión. Pre-cámara 5.

En la siguiente figura se muestra la penetración de los chorros de un ensayo que nos servirá como referencia.

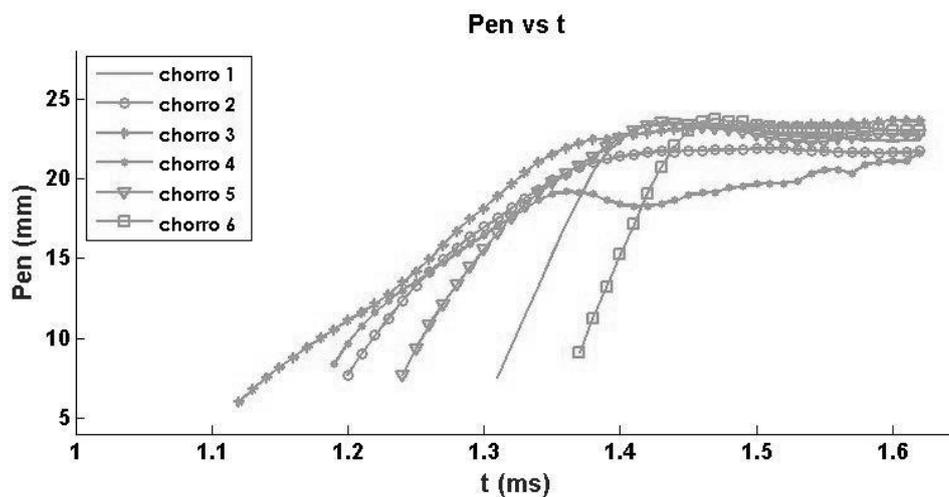


Figura 68. Curva de penetración de referencia.

Se puede observar cómo la penetración va aumentando progresivamente a medida que el tiempo aumenta también, como es lógico. En la primera fase, que comprende desde el inicio del chorro hasta los 10 mm, la pendiente con la que avanza la penetración puede ser de múltiples valores, siendo más o menos inclinada en función de variables como la presión en la pre-cámara o el diámetro de los orificios, entre otros. Sin embargo, en una segunda fase que va desde los 10 mm hasta los 20 mm, se suele observar una cierta correlación lineal de la penetración con el tiempo. Es debido a este hecho que se ha decidido obtener para esta fase una velocidad media para cada chorro, intentando obtener conclusiones adicionales objetivas.

En la última fase, la penetración se va estabilizando en torno a un valor cercano a los 22-23 mm. Esto no se debe a que los chorros lleguen a la pared, pues la cámara tiene 42 mm de radio, sino que es la ventana a través de la cual se observa el fenómeno la que limita este valor.

Se verá más adelante como algunos chorros adelantan su penetración antes de tiempo, pero lo hacen de forma más suave debido a que hay menor diferencia de presiones entre cámaras en ese instante. Así, por norma general, son los chorros más cercanos a la bujía los que penetran antes debido a que el inicio de la combustión ocurre en zonas más próximas a estos.

4.2.2 RESULTADOS: CURVAS DE PENETRACIÓN

A continuación, se muestran los resultados y conclusiones obtenidas, al igual que se ha realizado con las curvas de presión. En primer lugar, se presenta la tabla de las velocidades medias obtenidas para cada chorro de cada pre-cámara. Esta velocidad se ha obtenido dividiendo un determinado espacio recorrido por el chorro entre el tiempo que tarda en recorrer dicha distancia. Esta última es de 7 mm (desde los 10 mm hasta los 17 mm pues es el rango donde se observa linealidad). Cabe aclarar que en este caso solo se ha graficado un ensayo para facilitar la comprensión y la no saturación de las gráficas objeto de estudio.

PRE-CÁMARA	DOSADO	CHORRO Y VELOCIDAD DEL MISMO (m/s)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.5	233.3	77.8	63.6	70.0	116.7	233.3	-	-
	0.3	116.7	43.8	53.9	87.5	175.0	175.0	-	-
2	0.5	116.7	63.6	100.0	233.3	233.3	233.3	-	-
	0.3	70.0	58.3	116.7	175.0	233.3	233.3	-	-
3	0.5	175.0	70.0	87.50	140.0	140.0	175.0	175.0	116.7
	0.3	100	46.7	77.8	77.8	175.0	233.3	77.8	87.5
4	0.5	77.8	63.6	175.0	233.3	-	-	-	-
	0.3	116.7	63.6	100	116.67	-	-	-	-
5	0.5	140.0	53.9	58.33	87.5	140.0	140.0	-	-
	0.3	100.0	77.8	63.6	116.67	175.0	140.0	-	-

Tabla 21. Velocidades de cada chorro por pre-cámara y por condición.

PRE-CÁMARA 1

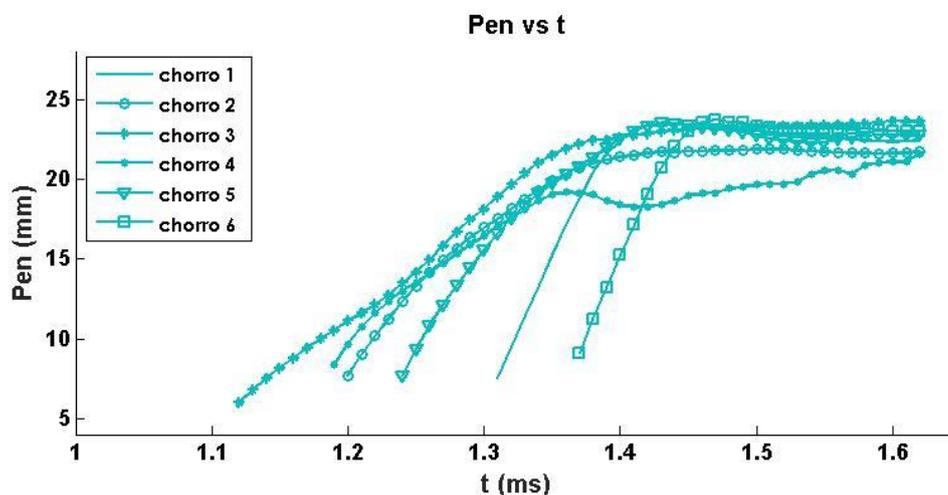


Figura 69. Curvas de penetración de los chorros. Pre-cámara 1 $Fr_{MC} = 0.5$

Tal como se expuso anteriormente, se pueden observar distintas pendientes en la primera fase, algunas más inclinadas que otras. Sin embargo, se puede observar que las penetraciones que poseen menor inclinación son las correspondientes a los chorros que inician antes. Esto es debido a que la presión en la pre-cámara en este instante de tiempo no es tan elevada como para producir una gran pendiente de penetración. Son los chorros más tardíos en salir los que poseen una pendiente más regular e inclinada, debiéndose al aumento de presión en la pre-cámara y un aumento en la turbulencia como consecuencia. Si relacionamos este fenómeno con los valores de velocidad, se observa una total coherencia entre ambas partes, pues los valores de velocidad media máxima se corresponden con los chorros con mayor pendiente.

Para esta condición, los chorros que se inician antes son el número 4, 3 y 2. Con una diferencia considerable, los chorros más tardíos son el primero y el último. Como se expuso anteriormente, esto es debido a la cercanía de la bujía y, en consecuencia, el desarrollo de la zona inicial de la combustión.

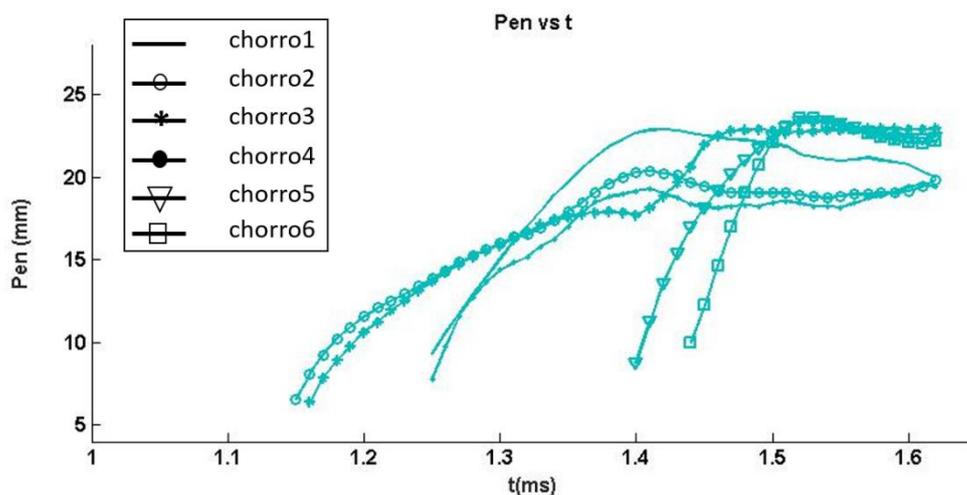


Figura 70. Curvas de penetración de los chorros. Pre-cámara 1. $Fr_{MC} = 0.3$

Por otro lado, la dependencia lineal comentada anteriormente entre el tiempo y la penetración en el rango de 10 a 20 mm, parece ser mucho más clara para el dosado de 0.5 en cámara principal, además de una forma de penetrar mucho más regular. Por el contrario, con un dosado de 0.3 la penetración de los chorros es mucho más irregular en su forma y la dispersión entre los chorros es mayor. Este es uno de los factores que penaliza a un dosado tan pobre, pues con irregularidades excesivas en el inicio y desarrollo de los chorros, el sistema quemará de una forma muy ineficaz.

Por otra parte, se puede observar cómo prácticamente todos los chorros en dosado 0.5 llegan antes a la penetración máxima posible, mientras que algunos correspondientes a un dosado de 0.3 ni si quiera alcanzan esta penetración. Esto puede deberse a la capacidad de propagación de la llama. En la condición de 0.5 los chorros consiguen penetrar a una distancia tal, que a partir de ahí se empiezan a inflamar con facilidad las zonas cercanas, mientras que en la condición de 0,3 es más complicado que las zonas cercanas al chorro se enciendan.

Este suceso se refuerza observando los valores de velocidad que obtiene esta condición, que son mucho menores a los obtenidos en la condición anterior. Es un suceso lógico, pues la combustión en el interior de la pre-cámara genera más presión en esta, y, por tanto, los chorros saldrán con más velocidad y turbulencia, llegando más lejos en la cámara principal.

PRE-CÁMARA 1 vs PRE-CÁMARA 2

CONDICIÓN 1: Fr pre-cámara = 1.1 / Fr cámara principal = 0.5

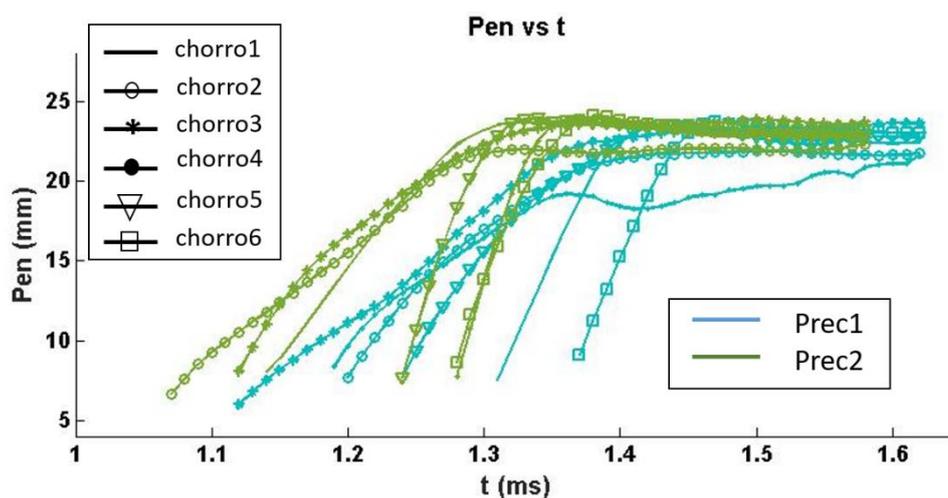


Figura 71. Curva de penetración pre-cámara 1 vs pre-cámara 2. $Fr = 0.5$

En primer lugar, se observa como los chorros de la pre-cámara 2 se inician antes que los chorros de la pre-cámara 1. Esto es debido al aumento de presión en la pre-cámara y a la mayor turbulencia generada por el desfase entre orificios (*swirl*), como se explicó anteriormente. Asimismo, las inclinaciones de estas curvas son más pronunciadas, lo que implica que llegan antes a alcanzar posiciones más adelantadas en la cámara principal. Se observa ahora que los primeros chorros son los tres primeros, mientras que el cuarto y el sexto se desarrollan prácticamente a la vez y con una penetración muy parecida. El movimiento de *swirl* generado en la pre-cámara puede haber desplazado la distribución de la mezcla hacia los primeros chorros, haciendo que estos se inicien antes que el resto. Las velocidades alcanzadas para los últimos chorros de esta segunda pre-cámara son mayores que en la primera, mejorándose así la turbulencia.

CONDICIÓN 2: Fr pre-cámara = 1.1 / Fr cámara principal = 0.3

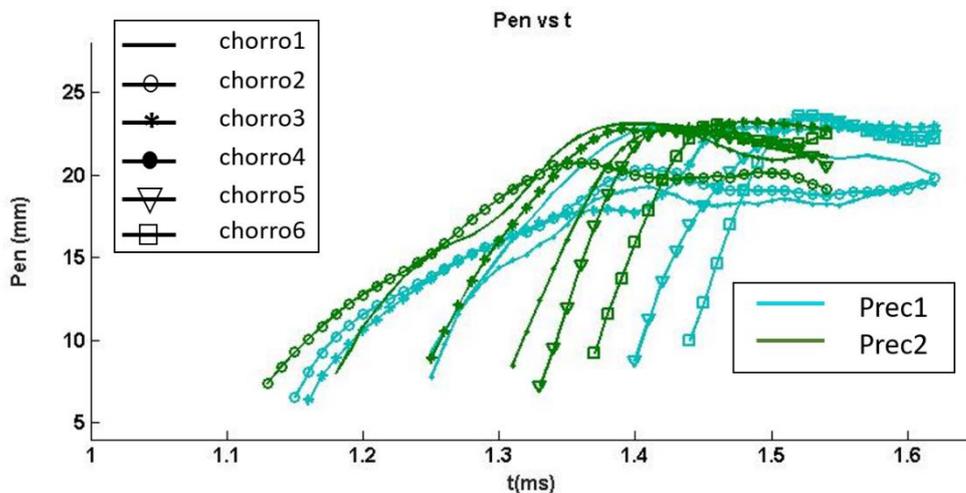


Figura 72. Curva de penetración pre-cámara 1 vs pre-cámara 2. $Fr = 0.3$

Para esta condición, los chorros de la pre-cámara siguen iniciándose antes, y además, se produce la misma distribución en los chorros que salen antes y los que se inician más tarde. Como se expuso en el primer análisis, con esta configuración más pobre en dosado se observan más irregularidades en las curvas de penetración. Sin embargo, si se comparan las velocidades de ambas pre-cámaras, se verá que la segunda sigue consiguiendo valores superiores en todos los chorros, por lo que el sistema también mejora en esta condición.

PRE-CÁMARA 1 vs PRE-CÁMARA 3

CONDICIÓN 1: Fr pre-cámara = 1.1 / Fr cámara principal = 0.5

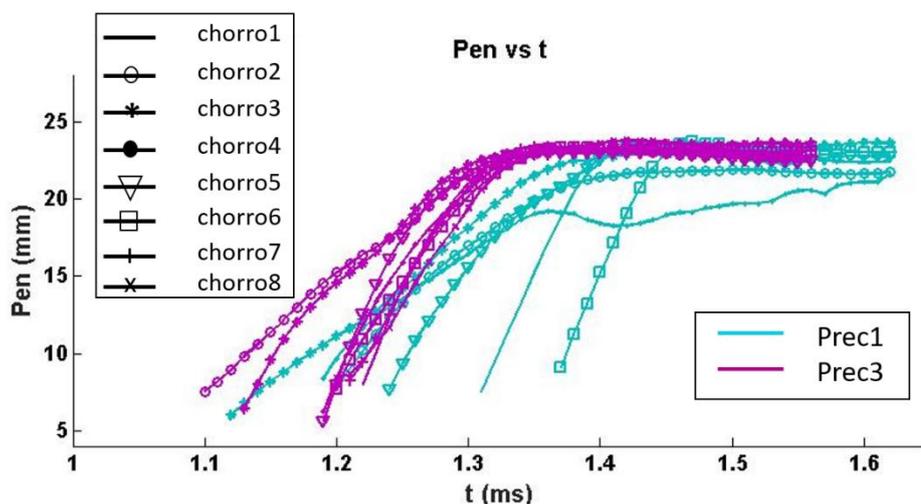


Figura 73. Curva de penetración pre-cámara 1 vs pre-cámara 3. $Fr = 0.5$

En primer lugar, se observa una diferencia muy grande en los tiempos de salida de los chorros, siendo más rápidos los chorros de la pre-cámara 3. Al igual que la pre-cámara 2, este hecho se debe al aumento de la presión en el interior de la pre-cámara y al movimiento que se genera en ambos volúmenes, que permite un aumento en la turbulencia.

Los primeros chorros en desarrollarse son el tercero y el segundo, sin embargo, el hecho a destacar en esta pre-cámara es la gran coordinación de salida en el resto de chorros, saliendo eyectados de la pre-cámara prácticamente a la vez. Además de esta disminución en la dispersión de los chorros, las pendientes de estos son muy parecidas. Este hecho puede confirmarse a través de las velocidades que se han calculado previamente. Parece que un mayor número de orificios favorece la regularidad de salida de los chorros para esta condición.

CONDICIÓN 2: Fr pre-cámara = 1.1 / Fr cámara principal = 0.3

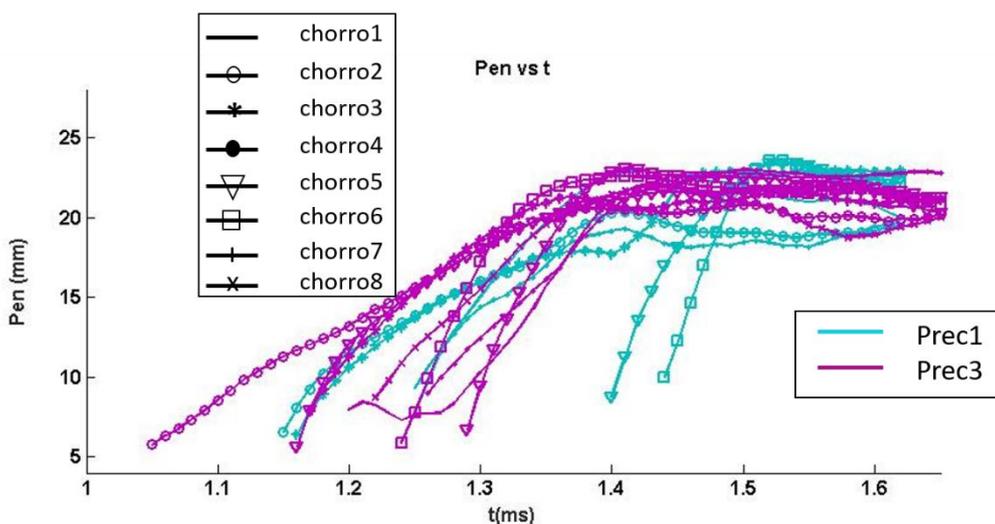


Figura 74. Curva de penetración pre-cámara 1 vs pre-cámara 3. $Fr = 0.3$

En la condición de 0.3 la regularidad mencionada anteriormente se pierde, pero los chorros siguen siendo más rápidos para la pre-cámara 3 y la pendiente de estos mismos parece más regular. Las velocidades obtenidas para esta pre-cámara son ligeramente superiores con respecto a la primera pre-cámara. No obstante, las irregularidades en la última fase de penetración persisten también en esta pre-cámara.

PRE-CÁMARA 1 vs PRE-CÁMARA 4

CONDICIÓN 1: Fr pre-cámara = 1.1 / Fr cámara principal = 0.5

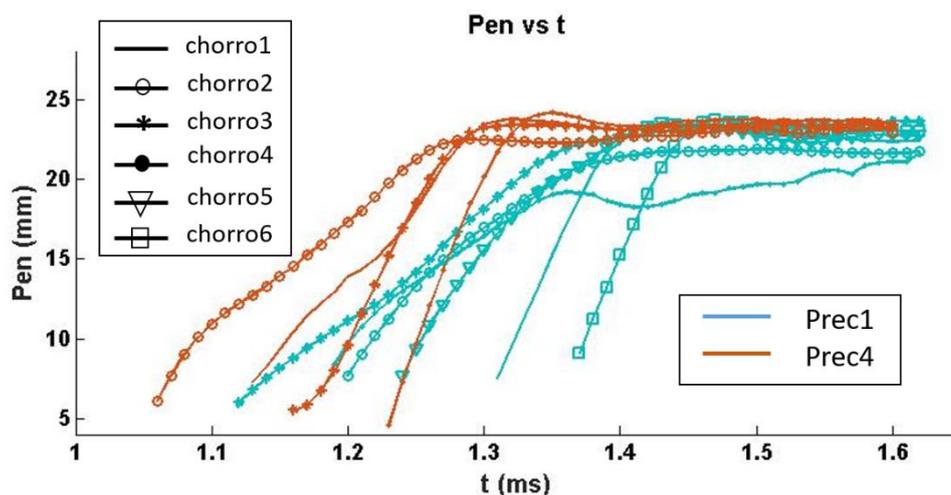


Figura 75. Curva de penetración pre-cámara 1 vs pre-cámara 4. $Fr=0.5$

En la pre-cámara 4 para esta condición se observa, al igual que en las anteriores pre-cámaras, que los chorros se desarrollan antes que en la pre-cámara 1 debido al *swirl* generado. En esta pre-cámara, el primero en salir es el segundo chorro, mientras que el último es cuarto. Al igual que lo expuesto en la primera pre-cámara, esto se puede deberse a la posición más favorable que posee este chorro con respecto a la trayectoria de la mezcla auxiliar en pre-cámara, mientras que el cuarto es el más alejado. No se observan diferencias significativas en cuanto a las velocidades de los chorros, ni en cuanto a la inclinación de estos mismos.

CONDICIÓN 2: Fr pre-cámara = 1.1 / Fr cámara principal = 0.3

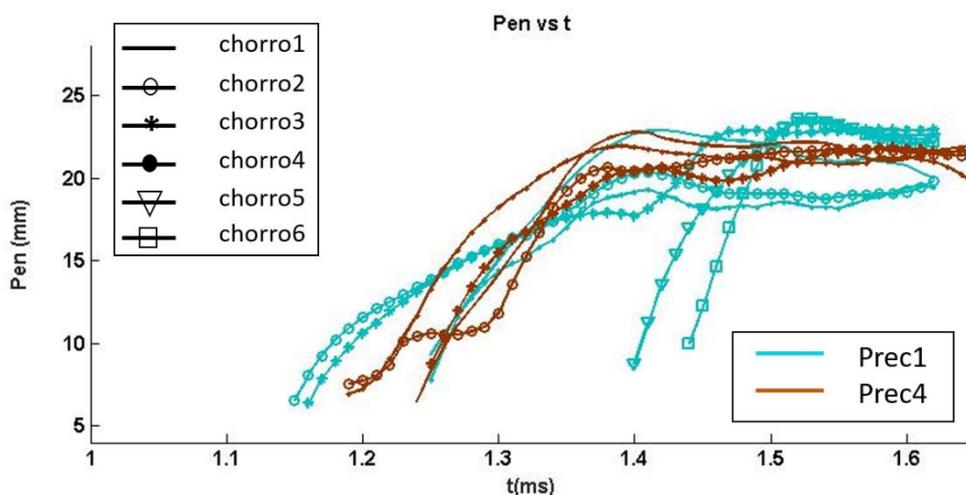


Figura 76. Curva de penetración pre-cámara 1 vs pre-cámara 4. $Fr=0.3$

En esta condición el tiempo de salida de los 4 chorros es similar, lo que mejora la coordinación en la salida de éstos. Sin embargo, en la última fase se puede observar como la penetración no llega a los valores alcanzados por el resto de pre-cámaras, suponiendo una peor penetración global. En esta pre-cámara se observan grandes irregularidades también en la segunda fase, aunque las velocidades obtenidas son óptimas.

PRE-CÁMARA 1 vs PRE-CÁMARA 5

CONDICIÓN 1: Fr pre-cámara = 1.1 / Fr cámara principal = 0.5

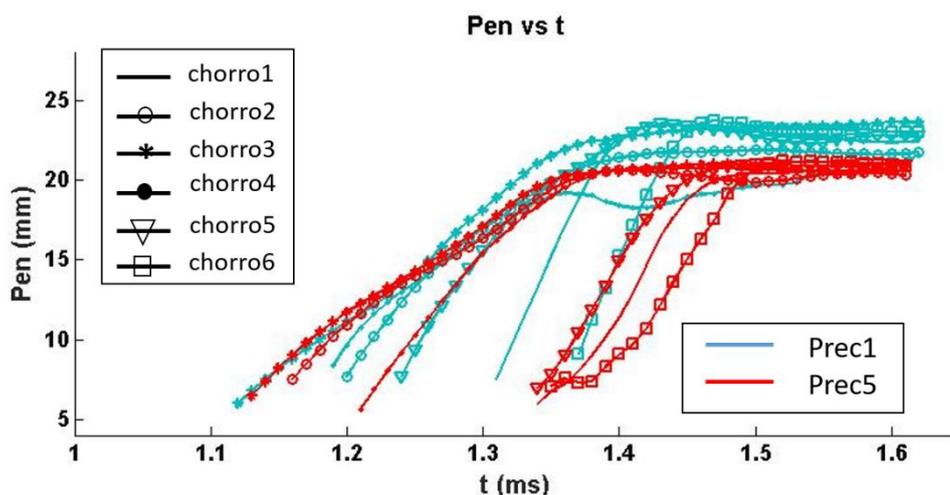


Figura 77. Curva de penetración pre-cámara 1 vs pre-cámara 5. $Fr = 0.5$

En esta pre-cámara, cabe hacer la aclaración de que debido al funcionamiento del procesado de las imágenes y a la técnica de visualización realizada, es imposible captar la penetración del chorro axial. Sin embargo, el procedimiento se ha intentado aplicar para el resto de orificios. Así, se puede observar como los tiempos en la salida de los chorros de la pre-cámara 5 son parecidos a los de la primera pre-cámara, así como la inclinación de los mismos.

Sin embargo, las velocidades de los chorros son inferiores a los de la primera pre-cámara, debido a la diferencia de presiones. Como la presión de pico en la pre-cámara es menor, los chorros van más lentos y no alcanzan valores de penetración tan elevados como en los casos anteriores. Por último, se observa un primer grupo de salida de chorros conformado por el número 2, 3 y 4, y un segundo grupo al que pertenecen los chorros 5, 6 y 1.

CONDICIÓN 2: Fr pre-cámara = 1.1 / Fr cámara principal = 0.3

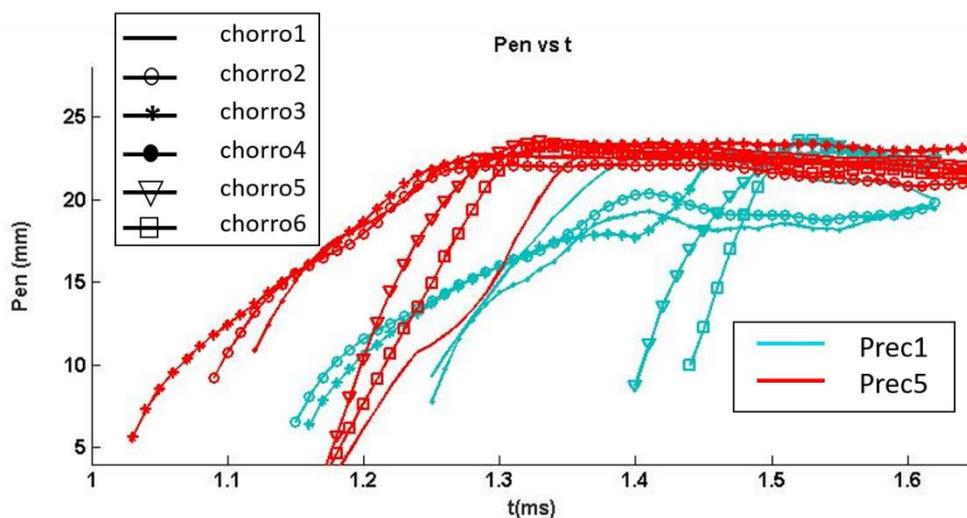


Figura 78. Curva de penetración pre-cámara 1 vs pre-cámara 5. $Fr=0.3$

Para esta condición, se observa un descenso en los tiempos de salida de los chorros, saliendo antes que los de la primera pre-cámara. Esto va en relación con el mejor funcionamiento visto en el análisis de la presión. Al producirse una mejor combustión en la pre-cámara, se originan unos chorros más turbulentos que entran con una mejor distribución en la cámara de combustión, permitiendo obtener más presión en la combustión principal. Por otro lado, se observa claramente como estos chorros llegan mucho antes al valor final, manteniéndose prácticamente sin irregularidades, lo que los diferencia del resto de pre-cámaras, suponiendo una mejor penetración global. Sin embargo, estos resultados tan optimistas pueden derivarse de un mal enfoque en el procesado.

Como se dijo algunas líneas atrás, a través de la metodología de procesado y captación del fenómeno es imposible determinar la penetración y características del chorro central, sin embargo, puede que la luz que se recoja en el procesado sea de este mismo orificio, lo que aumente en cierta medida los resultados en la penetración de los chorros (Figura 67). No obstante, se cree que este sistema posee más potencial en esta condición de dosado más pobre que en la anterior.

En conclusión, excepto la pre-cámara 4 en la condición de 0.3 y la pre-cámara 5 en la condición de 0.5, el resto de configuraciones mejoran los tiempos de salida de los chorros con respecto a la primera pre-cámara. Al igual que en la presión, las pre-cámaras 2 y 3 obtienen resultados similares, con unos chorros más veloces, llegando antes al valor de penetración final. La cuarta pre-cámara también mejora el comportamiento global de este parámetro para la condición de 0.5, no siendo así para la condición más pobre. Siguiendo con la tendencia ya vista en las curvas de presión, la pre-cámara 5 se comporta de una forma menos eficaz e irregular para la condición de 0.5, mientras que para la otra condición supone los mejores valores en cuanto a la penetración de los chorros y su comportamiento con respecto al tiempo.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Tras el análisis de los resultados, se comprende que la geometría de la pre-cámara posee una gran importancia en el fenómeno de la combustión de la tecnología TJI. A pesar de mantener constante el área de paso de los orificios en todas las pre-cámaras, en todas estas se observan comportamientos distintos al variar su configuración.

Así, un cierto desfase entre los ejes de los orificios da lugar a un movimiento de *swirl* que favorece la turbulencia de los chorros, mejorando la mezcla aire – combustible y obteniendo así más presión de pico (y por tanto, más trabajo). Por otra parte, el estudio realizado en cuanto al número de orificios comprende desde los cuatro hasta los ocho orificios, obteniendo mejores resultados generales con la balanza desplazada hacia un mayor número de estos (entre 6 y 8). Por último, un orificio axial se ha visto que no comporta una mejora en condiciones de dosado de alrededor 0.5, sin embargo, los resultados de la combustión con esta configuración en dosados más pobres muestra una mejoría considerable.

Se ha comprobado la efectividad que tiene la tecnología TJI en dosados pobres y además, se ha visto como pequeños cambios en la geometría de la pre-cámara pueden suponer mejoras considerables en el sistema. Por tanto, se concluye que esta alternativa se constituye como una opción muy prometedora para el mundo del motor, al ser capaz de trabajar con dosados muy pobres realizando así pocas emisiones y a su vez obteniendo unos resultados en la combustión más que aceptables, que permiten una mejora en el trabajo obtenido y, por tanto, en el rendimiento.

Para poder implementar en algún futuro esta tecnología, deben seguir realizándose investigaciones acerca de esta misma. Uno de los trabajos futuros que pueden investigarse más a fondo es el comportamiento en más rangos de operación de la pre-cámara con un orificio axial para entender mejor los fenómenos que se dan con esta configuración. Por otro lado, en este estudio se ha realizado una investigación variando ciertas características en cuanto a los orificios de la pre-cámara sin variar el área de paso de éstos, pero puede realizarse un trabajo de investigación acerca de otros muchos parámetros geométricos de la pre-cámara como su volumen total óptimo, la forma de esta misma, el área de paso de los orificios óptima etc.

Pese a que la RCEM permite realizar muchos ensayos con apenas dispersión entre ellos de muchas condiciones, sería conveniente analizar el comportamiento de esta tecnología en un motor real, para estudiar características como el régimen de giro variable o su comportamiento en carreras más cortas, estudiando la dinámica que se da en un funcionamiento cíclico a alta velocidad.

Pese a que en este estudio se ha visto la influencia que tiene el *swirl* en el sistema, la utilización de un pistón labrado (*bowl*) para provocar un efecto de *squish* también puede ser interesante, así como la optimización de los tres movimientos para conseguir un mayor rendimiento en esta tecnología.

Mediante técnicas de visualización como la quimioluminiscencia puede realizarse un estudio sobre la presencia de radicales OH^* intentando relacionar la cantidad y distribución de esta especie con el comportamiento y la dinámica de la combustión.

Por último, sería interesante la realización de un estudio que analizara las emisiones que se dan con un sistema de encendido por pre-cámara en un motor convencional real, para cuantificar realmente cual es el potencial de mejora que se puede obtener con esta tecnología en este ámbito.

APÉNDICE

Visualización de la combustión en las pre-cámaras

PRE-CÁMARA 1

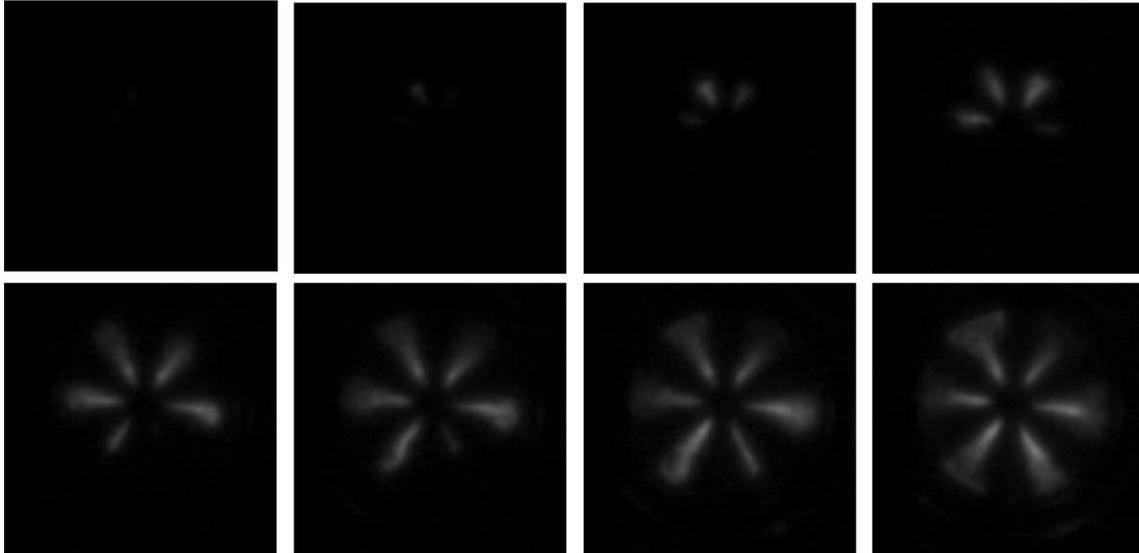


Figura 79. Pre-cámara 1. $Fr_{MC} = 0.5$

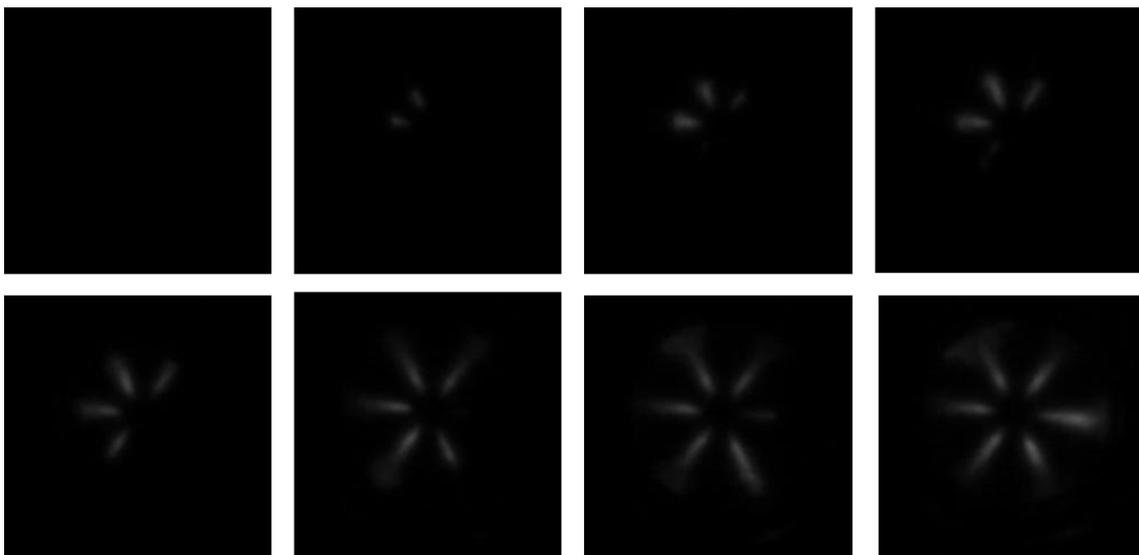


Figura 80. Pre-cámara 1. $Fr_{MC} = 0.3$

PRE-CÁMARA 2

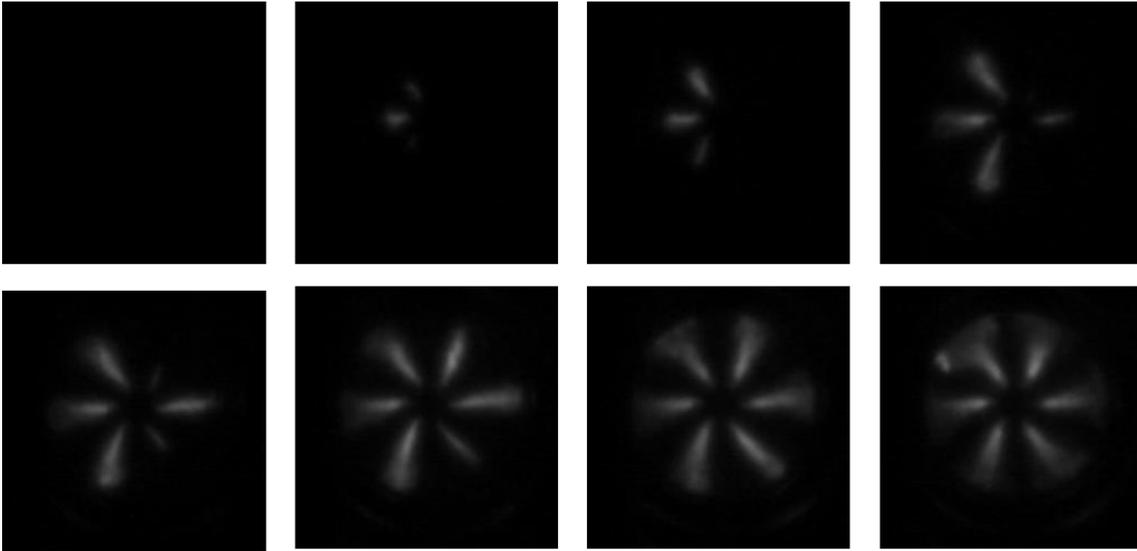


Figura 81. Pre-cámara 2. $Fr_{MC} = 0.5$

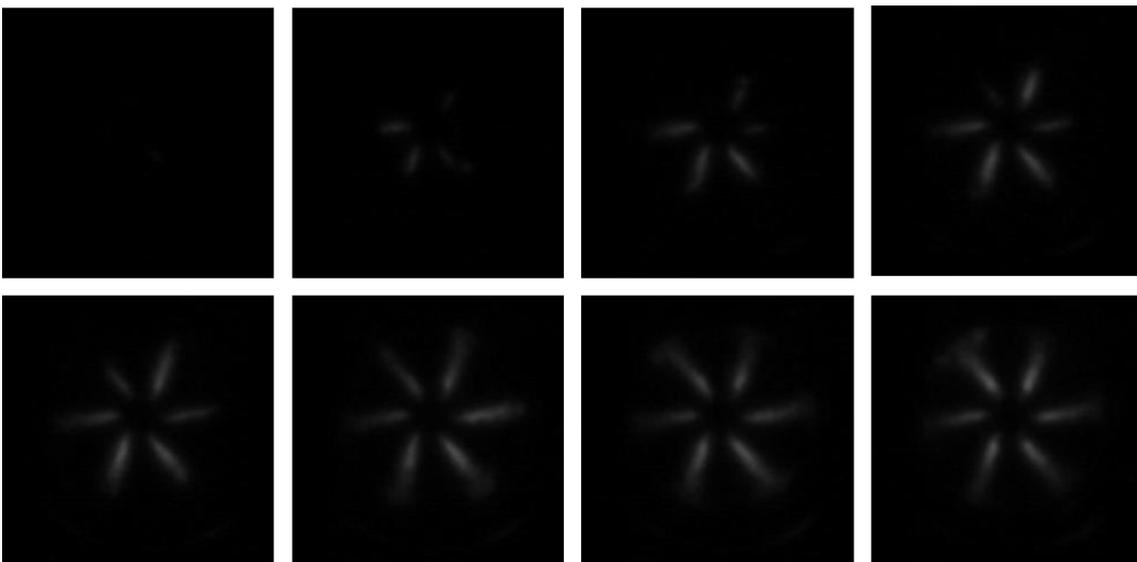


Figura 82. Pre-cámara 2. $Fr_{MC} = 0.3$

PRE-CÁMARA 3

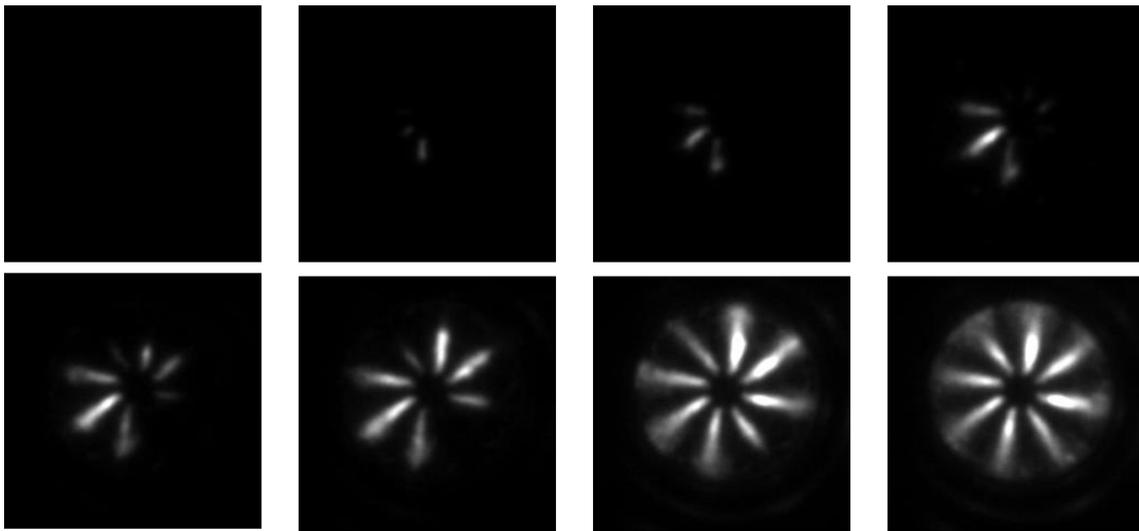


Figura 83. Pre-cámara 3. $Fr_{MC} = 0.5$

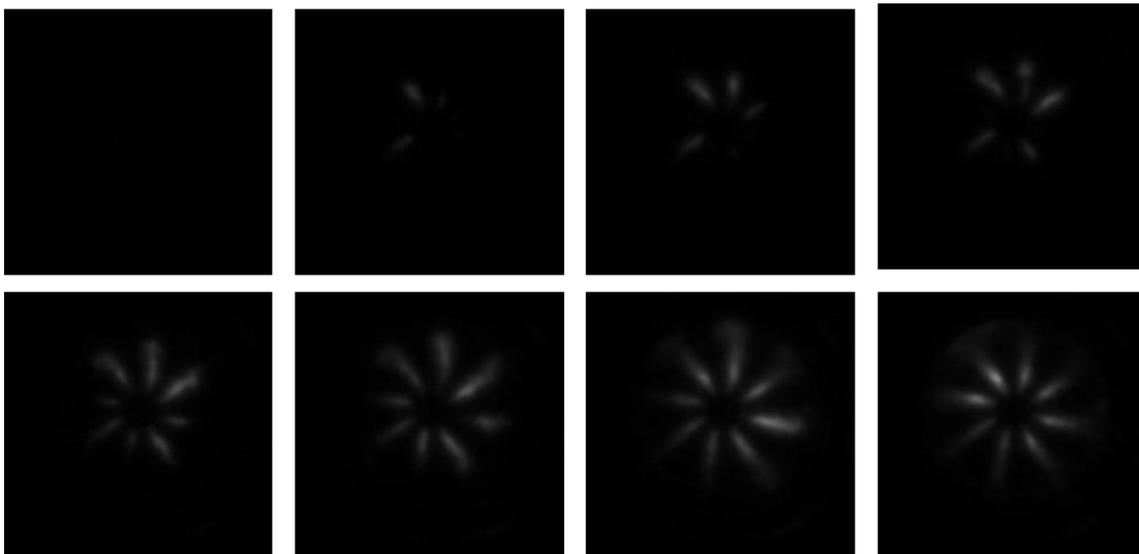


Figura 84. Pre-cámara 3. $Fr_{MC} = 0.3$

PRE-CÁMARA 4

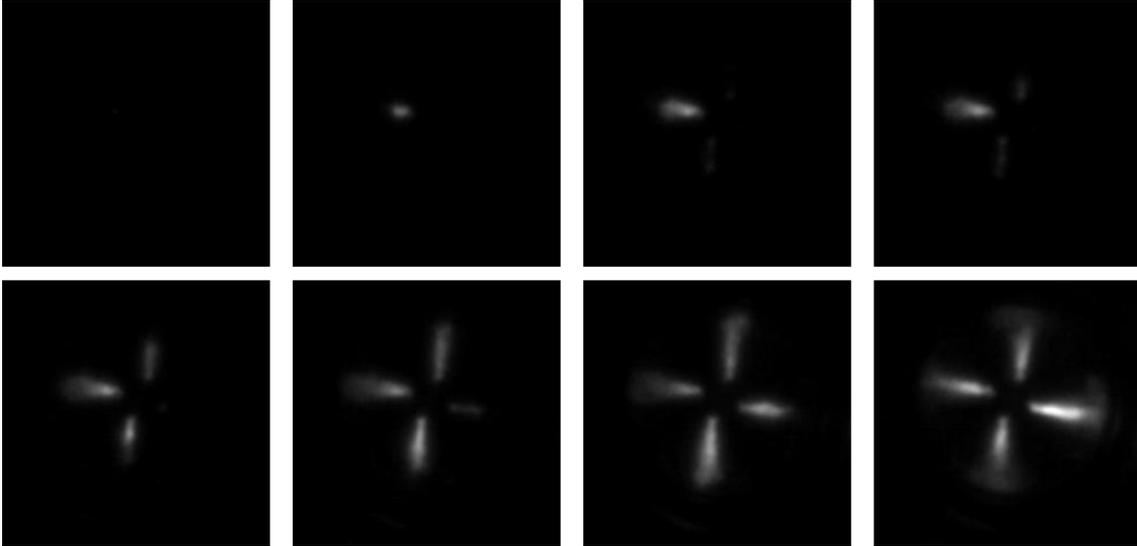


Figura 85. Pre-cámara 4. $Fr_{MC} = 0.5$

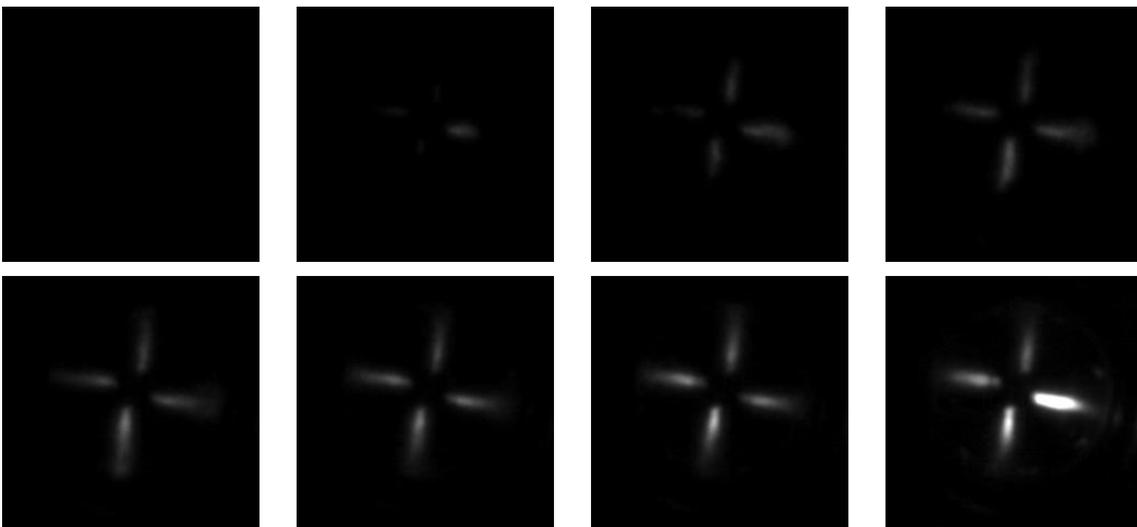


Figura 86. Pre-cámara 4. $Fr_{MC} = 0.3$

PRE-CÁMARA 5

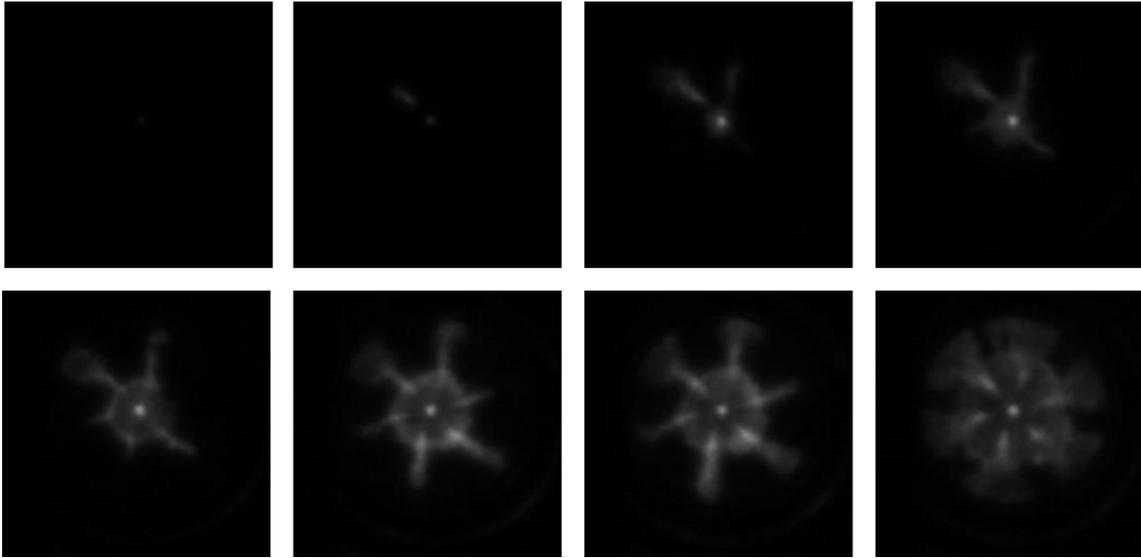


Figura 87. Pre-cámara 5. $Fr_{MC} = 0.5$

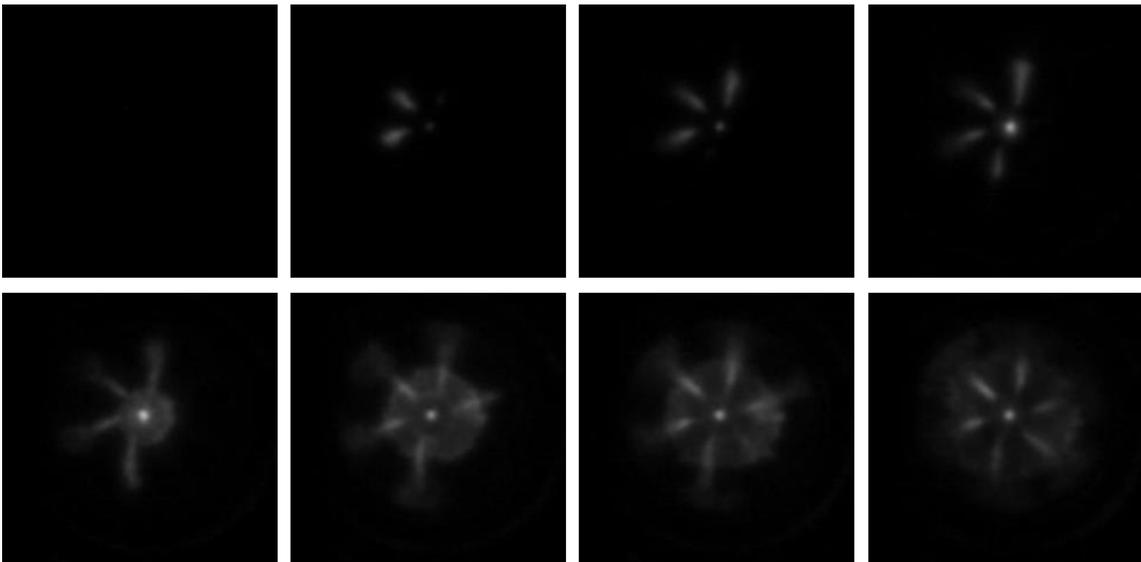


Figura 88. Pre-cámara 5. $Fr_{MC} = 0.3$

BIBLIOGRAFÍA

1. Payri, F. y Desantes, J.M. *Motores de Combustión Interna Alternativos*. Editorial Reverté, UPV Editorial, 2011.
2. Álvarez Flórez, J.A., *Motores alternativos de combustión interna*, Editorial: Edicions UPC
3. Apuntes de la asignatura *Combustión*. Grado en Ingeniería Mecánica. 2018
4. Apuntes de la asignatura *Motores térmicos*. Especialidad en Tecnología Térmica del Grado en Ingeniería Mecánica. 2018
5. "A single fuel pre-chamber jet ignition powertrain achieving high load, high efficiency and near zero NOx emissions." W.P.Attard, H.Blaxill MAHLE Powertrain. - JSAE 2011
6. "Flame kernel development for a spark initiated pre-chamber combustion system capable of high load, high efficiency and near zero NOx emission" W.P.Attard and P.Parsons. SAE International 2010
7. "A study of the influence of orifice diameter on a turbulent jet ignition system through combustion visualization and performance characterization in RCM" G.R.Gentz, E.Toulson. Applied Thermal Engineering – 2015
8. "Análisis del desarrollo de la combustión bajo condiciones de carga homogénea mediante el uso de la máquina de compresión y expansión rápida." Cristina Vazquez. 2018
9. "Estudio de un sistema de combustión por pre-cámara en una máquina de compresión – expansión rápida." Alvaro Fogué. 2018
10. DhanRaj (Octubre 2018), *Diesel Cycle vs Otto Cycle [Mech4study]*
11. *Virtual Combustion and Atomization Lab*, IIT Kanpur. Recuperado de: http://home.iitk.ac.in/~mishra/virtual_lab/documentor/theory1.html
12. Mayersohn, N. *The Internal Combustion Engine Is Not Dead Yet (2017)*. New York Times.
13. *Rapid Compression Machine*. Testem: <https://testem.de/en/engine/rapid-compression-machine/>
14. TeRCM-K84. *Rapid Compression Machine Analyzing in-Cylinder Spray Development and Combustion Processes*. Technical Manual Version 2.2. TESTEM
15. La Tierra llegará a un 'punto de no retorno' en 2035 si no se frena el cambio climático (2018). RTVE.

16. "An advanced optimization methodology for understanding the effects of piston bowl design in late injection low-temperature diesel combustion". Caroline L. Genzale, David D. Wickman, Rolf Reitz (2006)
17. Thermodynamic cycles. Carnot Cycle. Wikipedia 2019
18. "Mejora de una herramienta de diagnóstico de la combustión a partir de la presión instantánea en cámara mediante la incorporación de un modelo de tumble." D. Verdú (2016)
19. "¿Qué es la Turbulent Jet Ignition?" SoyMotor, Pol Santos. 2016
20. "F1: Burning Lean – Pre-chamber combustion technology" Everything technical [drivetribe], Craig Scarborough. 2018
21. "Ferrari's Formula 1 jet ignition." MotorSport. Mark Hughes. 2016
22. "Turbulent Jet Ignition: in the antechamber of F1 power." F1i magazine. 2015
23. Mahle Jet Ignition. Mahle Powertrain:
<https://www.mahle-powertrain.com/en/experience/mahle-jet-ignition/>
24. "RCM – Rapid Compression/Expansion Machine zur Simulation und optischen Untersuchung innermotorischer Verbrennungsvorgänge." Veröffentlicht. 2017 <http://www.maschinenbau-direkt.de/2017/11/30/rcm-rapid-compression-expansion-machine-zur-simulation-und-optischen-untersuchung-innermo-6486/>
25. Manual y software de la RCEM modelo TeRCM-K84.
26. Spark-Plug ZI33 ans ZI45. Product Guide. AVL.
27. "Vaasa laboratory puts fuel flexibility on firm foundations." ModernPowerSystems. 2018
28. Photron FASTCAM SA-Z datasheet:
29. Hamamatsu Photonics K.K highspeed gated image intensifier units. C10880-03C/-O3F/-13C/-13F
30. Sensor GU21D. AVL.com
31. Diaphragm Pumps for Air, Gases and Vapours. KNF labs. Series N035 AN.18 IP44-Motor
32. "Caracterización de las curvas de presión, par y potencia de un motor de combustión interna monocilíndrico bajo diferentes regímenes de operación." Daniela Marín Arias. 2018
33. "Desfasar señal de onda cuadrada." Foros de electrónica. 2018
34. EEN-E2002 Combustion technology LE2 Answers. Aalto University. School of engineering(2007)
35. Yokogawa. Products. Test & Measurement. DL850/DL850V ScopeCorder Yokogawa.com
36. Sistema de combustible con carburador e introducción a la inyección electrónica. Mecánica-fácil.com

-
37. "Common Rail Fuel Injection." Hannu Jääskeläinen, Magdi K. Khair. *DieselNet Technology guide*. 2015
 38. "Schlieren photography – How does it works?" Ian.org.
 39. "Caracterización experimental mediante técnicas ópticas de sprays en combustión con mezclas de combustibles gasolina y diésel." Pablo Escobedo. 2016-2017
 40. "Spray and combustion characterization for internal combustion engines using optical measuring techniques." S.N Zoid, Z.A Zainal. 2010
 41. "Measurement principles of PDA." Dantec dynamics.
 42. "¿What is a SI engine?" Yash Shekhar at Quora.com. 2017
 43. *Gasoline Direct Injection Engines Explained*. Stillrunningstrong.com
 44. *Automotive Systems*. SweetHeaven (2001-2004).
<https://www.waybuilder.net/sweethaven/MechTech/Automotive01/default.asp?unNum=4&lesNum=4&modNum=2>



SEGUNDA PARTE

PRESUPUESTO

PRESUPUESTO

En esta parte del proyecto se presentarán todos los recursos utilizados y el coste de los mismos. El presupuesto que se va a presentar es de contrata, por lo que se añadirá a los costes del estudio un 21% por Impuestos al Valor Añadido (IVA).

DESGLOSE DE RECURSOS

Los recursos utilizados para la realización del estudio se han dividido en los siguientes tipos:

- Recursos de personal
- Recursos materiales
- Recursos informáticos
- Recursos de instalaciones

A continuación, se presenta el desglose de todos estos.

RECURSOS DE PERSONAL

CÓDIGO	FACTOR	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
RP01	h	Doctor	1
RP02	h	Ingeniero	1
RP03	h	Becario	1

Tabla PR 1. Recursos de personal

RECURSOS MATERIALES

En la siguiente tabla se muestran los recursos materiales que aún no se han amortizado por completo y los recursos que se han adquirido a lo largo del estudio.

CÓDIGO	FACTOR	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
RM01	Ud	RCEM	1
RM02	Ud	Sensor AVL	1
RM03	L	Iso-octano	0.3
RM04	ud	Espejo	1
RM05	ud	Pre-cámara 2	1
RM06	ud	Pre-cámara 3	1
RM07	ud	Pre-cámara 4	1
RM08	ud	Pre-cámara 5	1

Tabla PR 2. Recursos materiales

El resto de recursos materiales utilizados se encuentran totalmente amortizados y por ello no se han incluido en el desglose.

RECURSOS INFORMÁTICOS

CÓDIGO	FACTOR	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
RI01	ud	PC	3
RI02	ud	Licencia Matlab	2

Tabla PR 3. Recursos informáticos.

El resto de los recursos informáticos no mencionados, como el software de la RCEM o el del intensificador, van incluidos como recursos adjuntos a estos elementos por lo que no figuran en esta sección.

RECURSOS DE INSTALACIONES

CÓDIGO	FACTOR	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
RT01	h	Sala de ensayos	1
RT02	h	Despacho	1

Tabla PR 4. Recursos de instalaciones.

DESGLOSE DE PRESUPUESTO

En este apartado se presenta el coste de cada recurso empleado, así como los costes totales del estudio.

COSTE DE PERSONAL

CÓDIGO	PRECIO UNITARIO (€/h)	CANTIDAD (h)	PRECIO TOTAL (€)
RP01	16,00	40	640
RP02	6.25	480	3000
RP03	3,00	560	1680

Tabla PR 5. Coste personal

COSTE MATERIALES

En la siguiente tabla se presentan los materiales que se han adquirido en el comienzo del estudio o a lo largo de este mismo.

CÓDIGO	PRECIO UNITARIO €	CANTIDAD (ud)	PRECIO TOTAL (€)
RM02	600,00	1	600
RM03	40,00 (€/L)	0.3(L)	12
RM04	110,00	1	110
RM05	330,00	1	330
RM06	330,00	1	330
RM07	330,00	1	330
RM08	330,00	1	330

Tabla PR 6. Coste materiales

Por otra parte, en este apartado se debe tener en cuanto el concepto de la amortización por el cual el precio de los elementos se devalúa. Puesto que la mayoría de elementos utilizados en el estudio se encontraban ya amortizados, solo se va a calcular el coste de amortización referente a la RCEM y los PC. Para ello, se utiliza la siguiente expresión:

$$C_{amor} = \frac{C_a - C_r}{T_a} \quad (P.1)$$

Donde:

C_a : coste de adquisición

C_r : devaluación en valor monetario

T_a : tiempo de uso

La Agencia Tributaria establece unos coeficientes máximos de pérdida de valor anual que son los que se han utilizado para este cálculo, y se asume un uso anual de 1800 horas. A continuación, se muestran dichos coeficientes para los elementos del estudio sujetos a la amortización.

ELEMENTO	C _a (€)	Coefficiente de amortización(%)	Periodo de amortización(años)
RCEM	335000,00	12	10
PC	700,00	26	5

Tabla PR 7. Parámetros de la amortización.

Se ha estimado un uso de la máquina RCEM de unas 120 horas, mientras que los PC se han utilizado alrededor de 180 horas.

CÓDIGO	PRECIO UNITARIO (€/h)	CANTIDAD (h)	TOTAL(€)
RM01	20,47	120	2456,4
RI01	0,25	180	45

Tabla 22. Coste elementos amortización.

COSTE INFORMÁTICA

CÓDIGO	PRECIO UNITARIO(€)	CANTIDAD (ud)	TOTAL(€)
RI01	105,00	3	315
RI02	0,00	2	0

Tabla 23. Coste recursos informáticos.

Las licencias utilizadas eran las correspondientes a las versiones de estudiantes y son gratuitas.

COSTE INSTALACIONES

Los costes asociados a las instalaciones utilizadas son costes de gasto de luz y agua, materiales y seguros de personal.

CÓDIGO	PRECIO UNITARIO(€)	CANTIDAD	TOTAL(€)
RT01	40,00	120	4800
RT02	20,00	480	9600

Tabla 24. Coste recursos instalaciones.

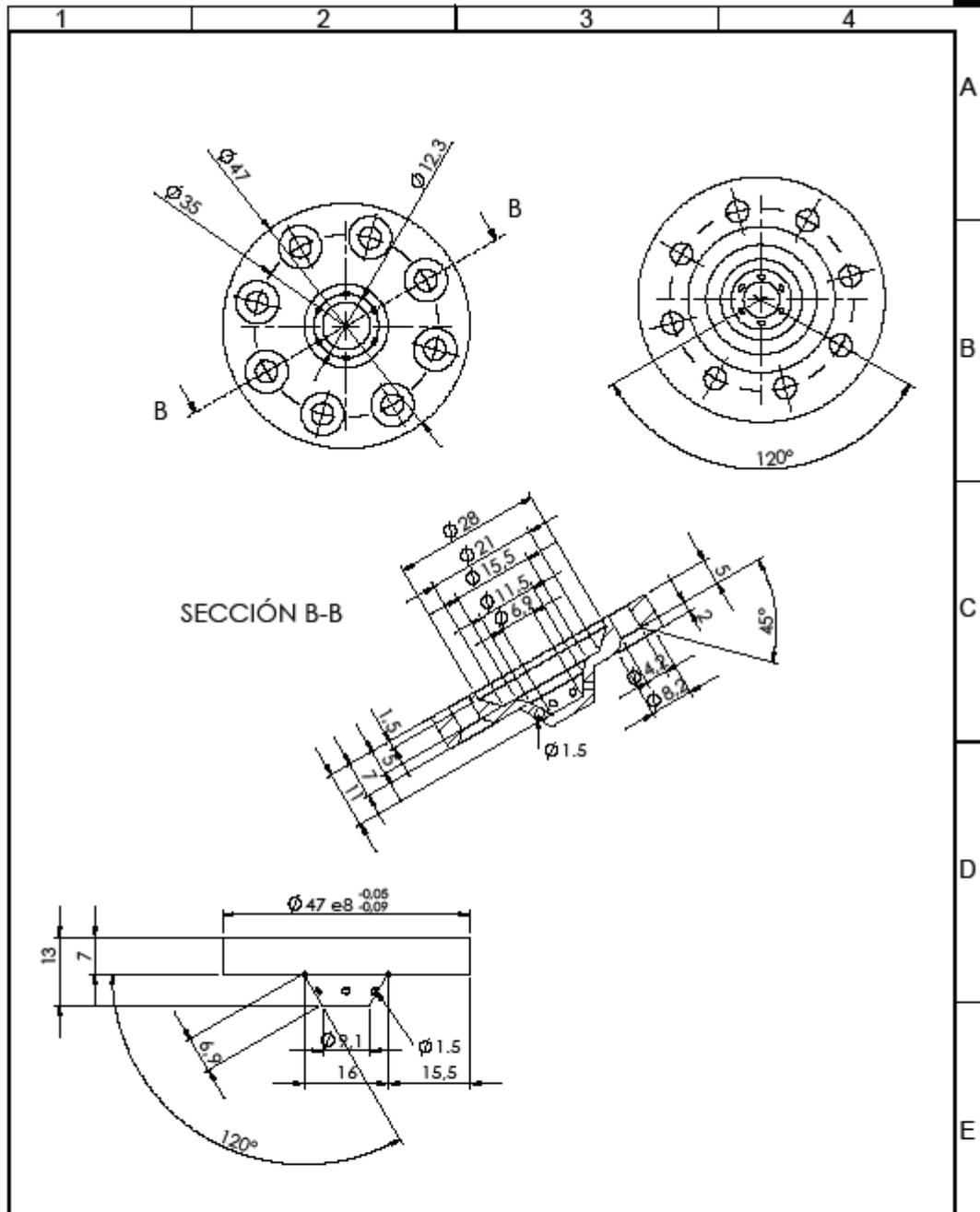
PRESUPUESTO TOTAL

COSTES DE PERSONAL	5320€
COSTES DE MATERIALES	2042€
COSTES DEL USO DE MATERIALES	2501,4€
COSTES DE INFORMÀTICA	315€
COSTES DE INSTALACIONES	14400€
TOTAL (SIN IVA)	24578,4€
TOTAL (+IVA 21%)	29739,86€

Tabla 25. Costes totales

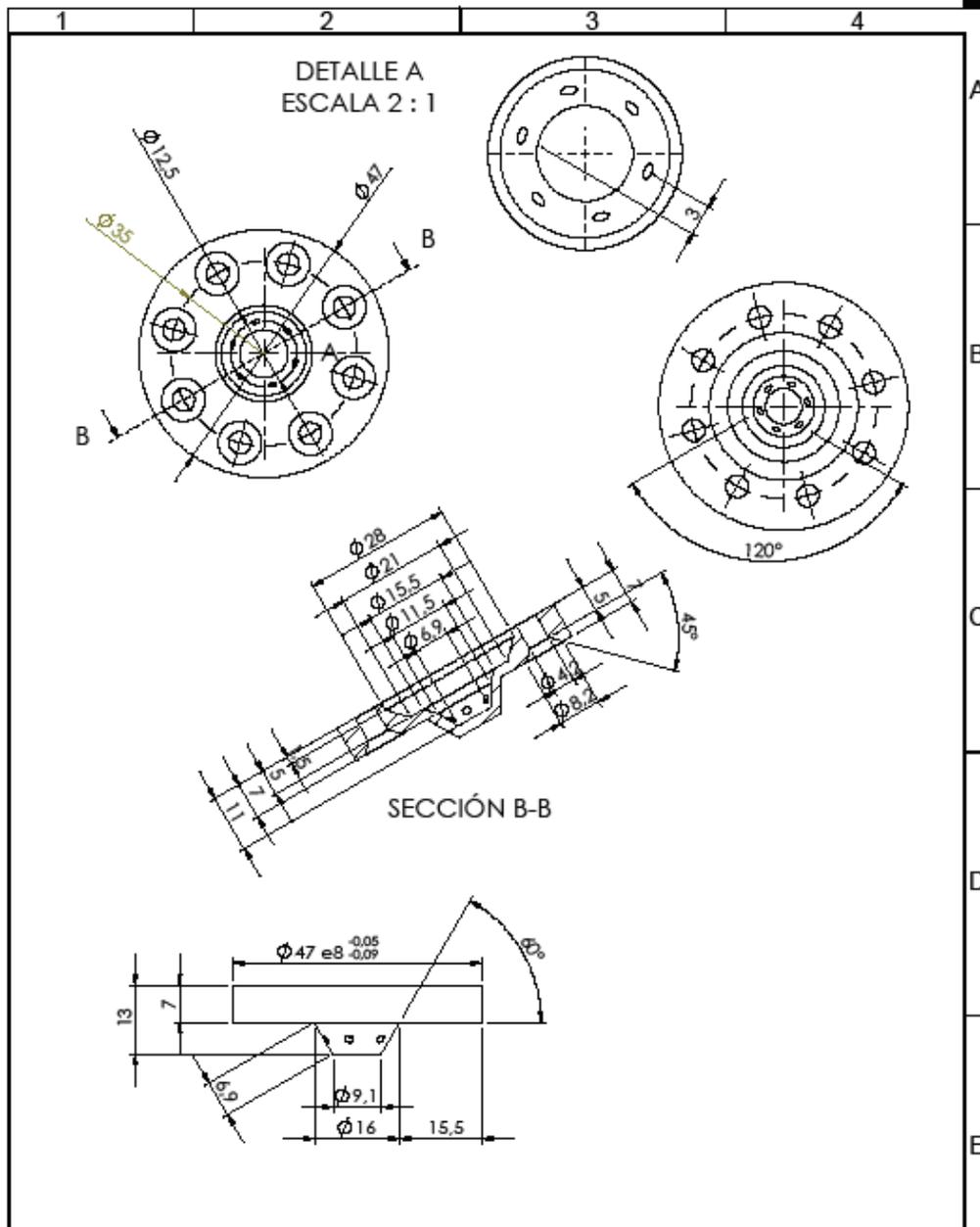
TERCERA PARTE
PLANOS

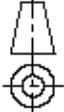
PRE-CÁMARA 1



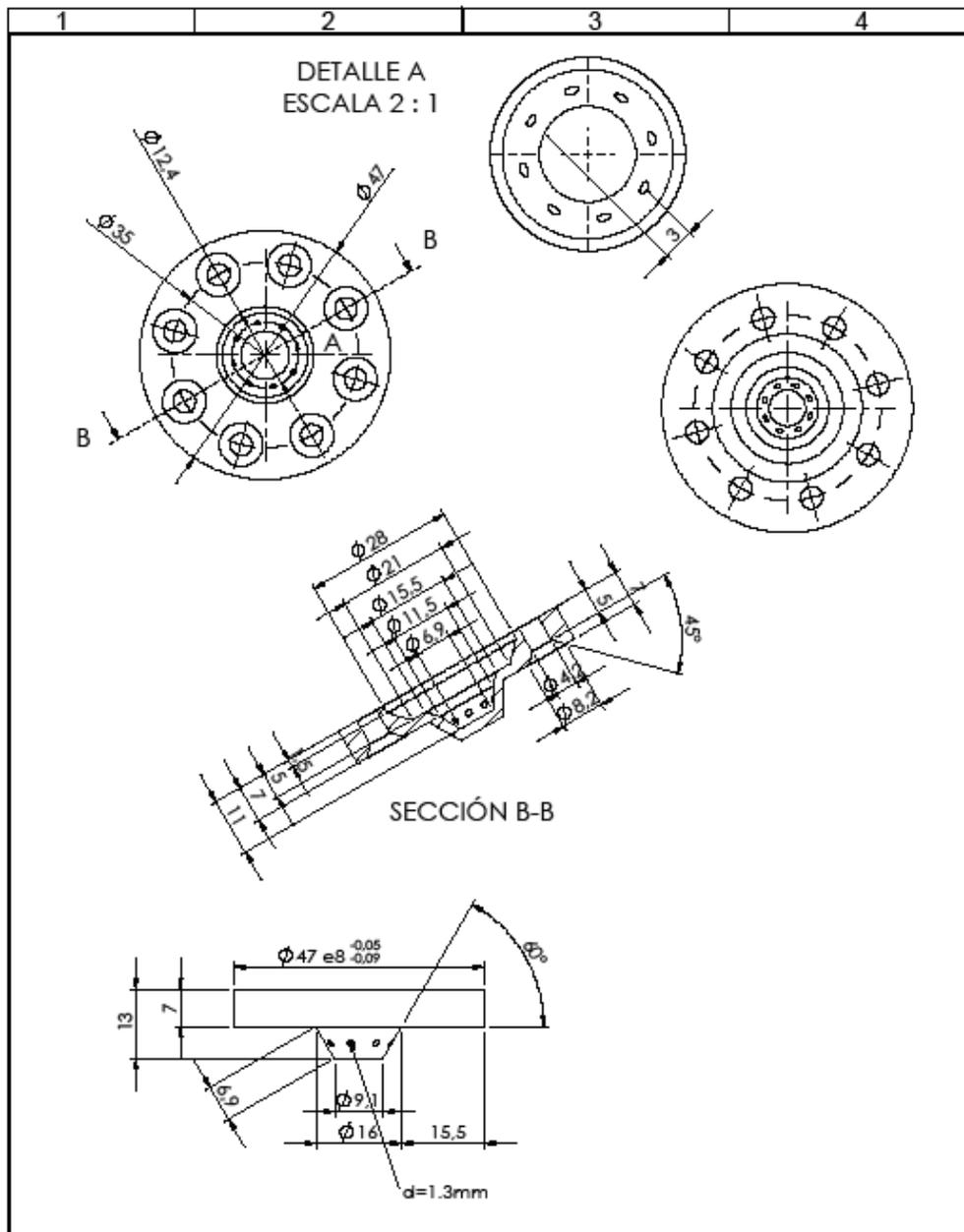
 UN.VERSITAT POL.ÉCNICA DE VALÈNCIA  Campro motores térmicos Centro de Viers, s/n 46103 València (Spain) Tel: +34 963877600 Email: cam@mot.upv.es	 	Tipo de documento: Si no se especifica lo contrario: Unidades en: mm Tolerancia Lineal: ± 0.1 Angular: $\pm 0.1^\circ$ Acabado superficial: N9	Creado por: Vincenzo Pagano	Fecha:
		Acabado:	Aprobado por: J.E.Del Rey Garcia	Descripción: 6 orificios con $D=1.5$ mm inclinados de 60° respecto al eje de la pre-cámara
Línea Inyección Producto SOLIDWORKS Educational	Educación: Solo para uso en la enseñanza.	Referencia:	Revisión:	Hoja: 1 of 3
A4	Escala: 1:1	Material: Acero Inox 316		

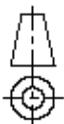
PRE-CÁMARA 2



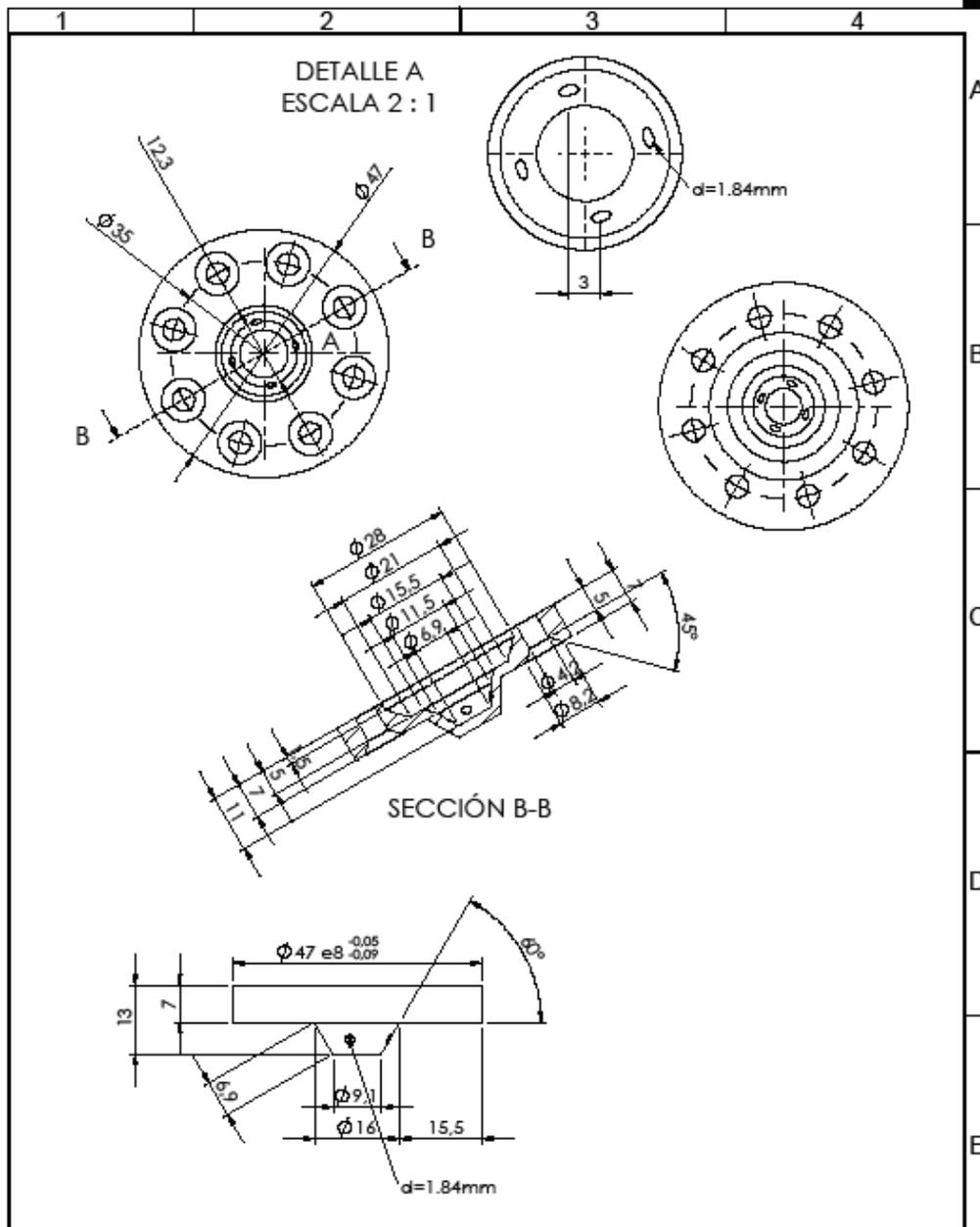
 <p>UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALÈNCIA</p>  <p>motores térmicos</p> <p>Centro de Investigación y Desarrollo en Motores Térmicos Calle de Vera, s/n 46102 Valencia (Spain) Tel: +34 963877000 E-mail: cmt@mot.apv.es</p>	 <p>Acabado:</p>	Tipo de documento:	Creado por: Vincenzo Pagano	Fecha:
		<p>Si no se especifica lo contrario: Unidades en: mm Tolerancia Lineal: ± 0.1 Angular: $\pm 0.1^\circ$ Acabado superficial: N9</p>	Aprobado por: J.E. Del Rey Garcia	
<p>Linea Inyección Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.</p>		<p>Descripción: 6 orificios con D=1.5mm inclinados de 60° respecto al eje de la pre-cámara y desfasado entre ellos como muestra el detalle A</p>		
A4	Escala: 1:1	Material: Acero Inox 316	Referencia:	Revisión: Hoja: 1 of 1

PRE-CÁMARA 3



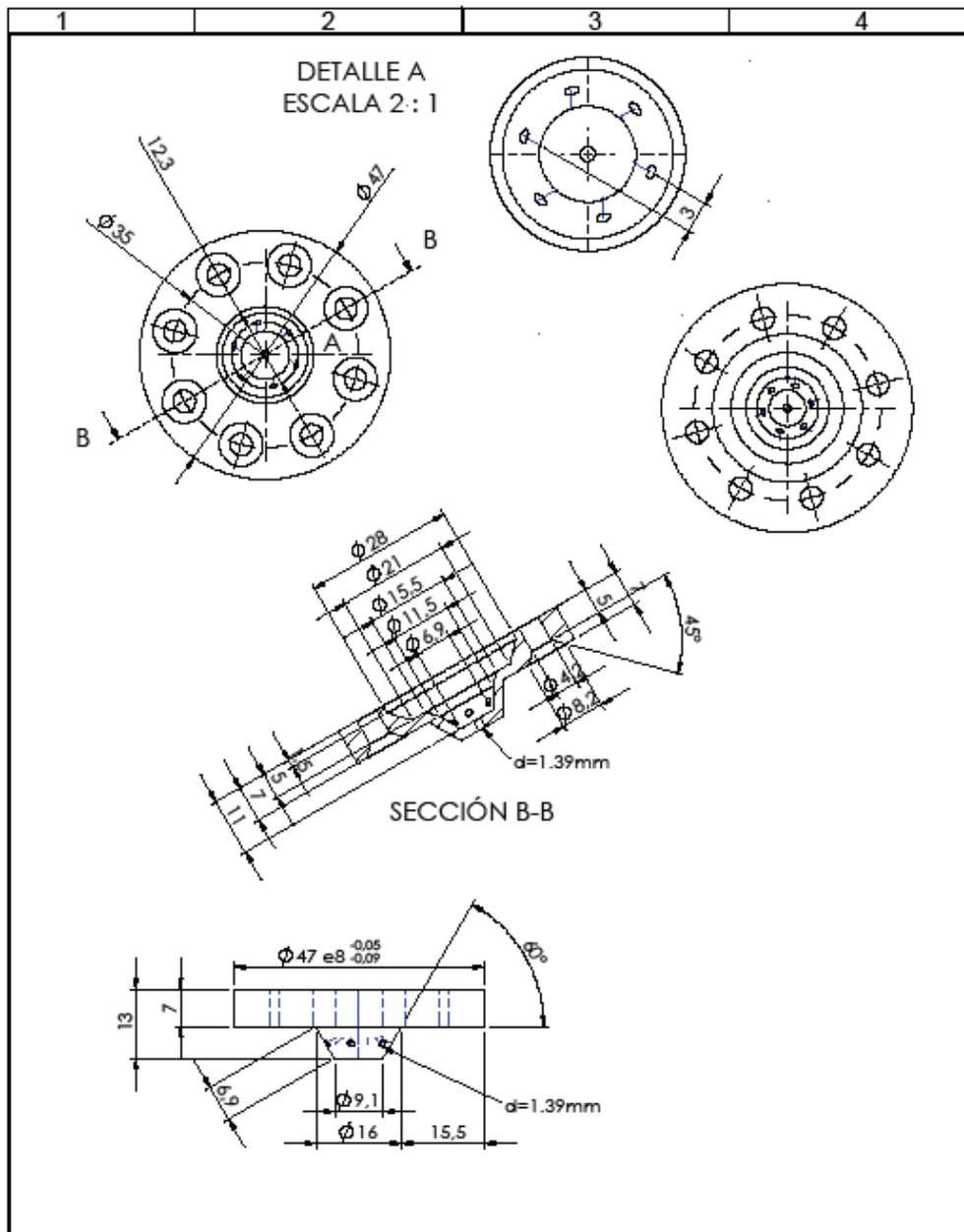
 <p>UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALÈNCIA</p>  <p>motores térmicos</p> <p>Centro de Viro, s/n 46022 Valencia (Spain) Tel: +34 963877000 E-mail: cm@mot.apv.es</p>	 <p>Acabado:</p>	Tipo de documento:	Creado por: Vincenzo Pagano	Fecha:
		<p>Si no se especifica lo contrario: Unidades en: mm Tolerancia Lineal: ± 0.1 Angular: $\pm 0.1^\circ$ Acabado superficial: N9</p>	Aprobado por: J.E. Del Rey Garcia	
<p>Linea Inyección Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.</p>		<p>Descripción: 8 orificios con $D=1.3\text{mm}$ inclinados de 60° respecto al eje de la pre-cámara y desfasado entre ellos como muestra el detalle A</p>		
A4	Escala: 1:1	Referencia:	Revisión:	Hoja: 1 of 1

PRE-CÁMARA 4



<p>UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALÈNCIA</p> <p>Motores térmicos</p> <p>Centro de Viro, s/n 46022 Valencia (Spain) Tel: +34 963877000 E-mail: cm@mat.upv.es</p>	<p>Acabado:</p>	Tipo de documento:	Creado por: Vincenzo Pagano	Fecha:
		<p>Si no se especifica lo contrario: Unidades en: mm Tolerancia Lineal: ± 0.1 Angular: $\pm 0.1^\circ$ Acabado superficial: N9</p>	Aprobado por: J.E. Del Rey Garcia	
<p>Linea Inyección Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.</p>		<p>Descripción: 4 orificios con $D=1.84\text{mm}$ inclinados de 60° respecto al eje de la pre-cámara y desfasado entre ellos como muestra el detalle A</p>		
A4	Escala: 1:1	Referencia:	Revisión:	Hoja: 1 of 1

PRE-CÁMARA 5



<p>UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALÈNCIA</p> <p>Motores Térmicos</p> <p>Centro de Viro, s/n 46022 Valencia (Spain) Tel: +34 963771800 E-mail: ctm@mat.upv.es</p>	<p>Acabado:</p>	Tipo de documento:	Creado por: Vincenzo Pagano	Fecha:
		Si no se especifica lo contrario: Unidades en: mm Tolerancia Lineal: ±0.1 Angular: ±0.1° Acabado superficial: N9	Aprobado por: J.E. Del Rey Garcia	
Linea Inyección Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.		Descripción: 6 orificios con D=1.39mm inclinados de 60° respecto al eje de la pre-cámara y desfasado entre ellos como muestra el detalle A. 1 orificio axial con D=1.39mm		
A4	Escala: 1:1	Acero Inox 316	Referencia:	Revisión: Hoja: 1 of 1