



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LOS ASPECTOS GEOMÉTRICOS SOBRE LAS PRESTACIONES DE UN SISTEMA DE ENCENDIDO POR PRECÁMARA DE TIPO PASIVO PARA MOTORES DE ENCENDIDO PORVOCADO DE NUEVA GENERACIÓN

AUTOR: JAIME TORRES SÁNCHEZ

TUTOR: RICARDO NOVELLA ROSA

COTUTOR: JOSEP GÓMEZ SORIANO

Curso Académico: 2020-21

RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Grado plantea como objetivo principal el estudio de un sistema de encendido por precámara de tipo pasivo para motores de encendido provocado y sus prestaciones frente a diferentes combustibles alternativos, además de gasolina. Adicionalmente, se pondrá atención al impacto de los diferentes parámetros que definen la geometría de la propia precámara, fundamentalmente su volumen y el área de paso de los orificios que conectan dicha precámara con la cámara de combustión principal. Para alcanzar este objetivo se utilizará una herramienta de simulación 1D que permite reproducir los flujos termofluidodinámicos característicos en este tipo de motores, incluyendo aquellos que se desarrollan en el interior de la precámara una vez integrada en el modelo completo del motor, junto con un modelo 1D de chorro gaseoso que posibilita el análisis de las características fundamentales de los chorros eyectados desde la precámara hacia la cámara principal. Una vez establecidas las herramientas y seleccionados los combustibles alternativos y parámetros con los que se evaluará las prestaciones del concepto, se procederá a realizar una serie de estudios diseñados para identificar el efecto aislado de cada uno de estos factores para entender no sólo la sensibilidad del concepto de encendido sino también para establecer criterios de diseño que permitan optimizarlo en el futuro. Este Trabajo Fin de Grado pretende contribuir a generar el conocimiento necesario para desarrollar motores de encendido provocado de nueva generación más eficientes y con menos emisiones de CO₂ de aplicación al sector de transporte por carretera, en línea con las líneas estratégicas establecidas por las instituciones Europeas y Españolas.

Palabras clave: Motor de Encendido Provocado; Sistema de Encendido por Precámara; Encendido por Chorro Turbulento; Modelado 1D de sistemas

ABSTRACT

The main objective of this Final Degree Project is the study of a passive-type pre-chamber ignition system for spark-ignition engines and its performance against different alternative fuels, in addition to gasoline. Besides, attention will be paid to the impact of the different parameters that define the geometry of the pre-chamber itself, fundamentally its volume and the passage area of the orifices that connect said pre-chamber with the main combustion chamber. To achieve this objective, a 1D simulation tool will be used that allows to reproduce the characteristic thermofluid-dynamic flows in this type of engines, including those that take place inside the pre-chamber once it has been integrated into the complete engine model, together with a 1D model of gaseous jet that allows the analysis of the fundamental characteristics of the jets ejected from the pre-chamber to the main chamber. Once the tools have been established and the alternative fuels and parameters with which the performance of the concept will be evaluated have been selected, a series of studies will be carried out designed to identify the isolated effect of each of these factors to understand not only the sensitivity of the concept, but also to establish design criteria to optimize it in the future. This Final Degree Project aims to contribute to generate the necessary knowledge to develop new generation spark-ignition engines that are more efficient and with less CO₂ emissions applicable to the road transport sector, in line with the strategic lines established by the European institutions and Spanish.

Keywords: Spark-Ignition Engine; Pre-chamber Ignition; Turbulent Jet Ignition; 1D System Modeling

RESUM

El present Treball Fi de Grau planteja com a objectiu principal l'estudi d'un sistema d'encesa per precàmbra de tipus passiu per a motors d'encesa provocat i les seves prestacions enfront de diferents combustibles alternatius, a més de gasolina. A més, es posarà atenció a l'impacte dels diferents paràmetres que defineixen la geometria de la pròpia precàmbra, fonamentalment el seu volum i l'àrea de pas dels orificis que connecten aquesta precàmbra amb la cambra de combustió principal. Per assolir aquest objectiu s'utilitzarà una eina de simulació 1D que permet reproduir els fluxos termofluidodinàmics característics en aquest tipus de motors, incloent aquells que es desenvolupen a l'interior de la precàmbra un cop integrada en el model complet de l'motor, juntament amb un model 1D de raig gasós que possibilita l'anàlisi de les característiques fonamentals dels dolls ejectats des de la precàmbra cap a la càmera principal. Un cop establertes les eines i seleccionats els combustibles alternatius i paràmetres amb els quals s'avaluarà les prestacions de l'concepte, es procedirà a realitzar una sèrie d'estudis dissenyats per identificar l'efecte aïllat de cada un d'aquests factors per entendre no només la sensibilitat de l'concepte d'encesa sinó també per establir criteris de disseny que permetin optimitzar en el futur. Aquest Treball Fi de Grau pretén contribuir a generar el coneixement necessari per desenvolupar motors d'encesa provocat de nova generació més eficients i amb menys emissions de CO₂ d'aplicació a el sector de transport per carretera, en línia amb les línies estratègiques establertes per les institucions Europees i espanyoles.

Paraules clau: Motor de Encesa Provocat; Sistema d'Encesa per precàmbra; Encesa per Raig Turbulento; Modelatge 1D de sistema

Agradecimientos

Estas líneas están dedicadas a todas aquellas personas que, de una forma u otra y en mayor o menor medida, han contribuido a que hoy me encuentre realizando este Trabajo Final de Grado, y con ello finalizando mis estudios de grado. Gracias...

A *Ricardo Novella Rosa*, profesor del departamento del CMT-Motores Térmicos en la Universidad Politécnica de Valencia y tutor de este TFG, por brindarme esta oportunidad de poder trabajar junto con él y su equipo en este importante proyecto y confiar en mí para poder llevarlo a cabo. Gracias también por tu esfuerzo y dedicación para que esto saliera bien, por tu buen humor y capacidad para enseñar.

A *Pablo José Martínez Hernández*, doctorando del proyecto en el CMT, por tenderme la mano desde el primer día. Has sido una persona fundamental para adquirir los conocimientos que necesitaba y, no sólo eso, también durante todo el proceso de este trabajo. Nunca ha importado el momento, que siempre has estado dispuesto a ayudarme con todo lo que he necesitado. Sin ti esto no hubiera sido posible y te estaré siempre muy agradecido.

A mis padres y a mi hermano, por ser mi pilar fundamental. Gracias por confiar en mí siempre, por vuestra lucha y sacrificio para que hoy pueda estar donde estoy y por ser ese ejemplo en el que fijarme para ser la persona que he llegado a ser. Todo esto es gracias a vosotros. No puedo estar más agradecido y orgulloso de vosotros.

A mi familia y amigos, por ser un apoyo constante y estar siempre conmigo. Que hoy esté aquí realizando este trabajo a punto de finalizar mis estudios y escribiendo estas líneas es, por supuesto, también gracias a todos y cada uno de vosotros. Todos me aportáis cosas muy importantes y soy la persona que soy también gracias a vosotros.

A todos, muchas gracias.

ÍNDICE GENERAL

DOCUMENTO I MEMORIA	1
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	2
1.1. CONTEXTO GLOBAL, PROBLEMA Y ALTERNATIVAS	2
1.2. JUSTIFICACIÓN Y MOTIVACIÓN	6
1.3. OBJETIVOS	7
1.4. VIABILIDAD	7
1.5. ESTRUCTURA DEL TRABAJO	8
CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	9
2.1. MCIA: DIFERENCIAS MEP Y MEC	9
2.2. MEP: CONCEPTO Y MEJORA DE COMBUSTIÓN	16
2.3. SISTEMAS AVANZADOS DE ENCENDIDO DE ALTA ENERGÍA EN MEP	18
2.4. SISTEMA DE ENCENDIDO POR PRECÁMARA. TJI	21
CAPÍTULO 3: HERRAMIENTAS EXPERIMENTALES /TEÓRICAS Y METODOLOGÍA.....	25
3.1. MOTOR EXPERIMENTAL	25
3.2. GT-SUITE	29
3.2.1. Modelos GT-POWER.....	30
3.3. DICOM	32
3.4. MATLAB	32
3.5. METODOLOGÍA.....	32
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS SISTEMA DE ENCENDIDO POR PRECÁMARA DE TIPO PASIVO FRENTE A DISTINTOS COMBUSTIBLES	36
4.1. INTRODUCCIÓN	36
4.2. VALIDACIÓN DEL MODELO	37
4.3. EVALUACIÓN DE RESULTADOS.....	39
4.3.1. Análisis Previo de Combustibles.....	39
4.3.1.1. Velocidad de combustión laminar.....	39
4.3.1.2. Emisiones. Evaluación LCA	41
4.3.2. Configuración de Modelos	42

4.3.3.	Resultados en Alta Carga/Régimen	44
4.3.4.	Resultados en Baja Carga/Régimen.....	50
4.4.	CONCLUSIONES	54
CAPÍTULO 5: ELEVACIÓN DE PRESTACIONES MEDIANTE SISTEMAS AVANZADOS DE ENCENDIDO DE ALTA ENERGÍA		55
5.1.	INTRODUCCIÓN	55
5.2.	EVALUACIÓN DE RESULTADOS.....	56
5.2.1.	Recuperación de Prestaciones con los Combustibles Lentos.....	57
5.2.1.1.	Resultados en alta carga/régimen	57
5.2.1.2.	Resultados en baja carga/régimen.....	61
5.2.2.	Relevancia de los Parámetros Relativos al Proceso de Combustión en la Precámara.....	64
5.3.	CONCLUSIONES	67
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES FINALES Y TRABAJOS FUTUROS		69
6.1.	CONCLUSIONES FINALES	69
6.2.	TRABAJOS FUTUROS.....	72
BIBLIOGRAFÍA		74
DOCUMENTO II PRESUPUESTO		77
PRESUPUESTO DEL PROYECTO		78
1.	INTRODUCCIÓN	78
2.	CUADROS DE PRECIOS BÁSICOS.....	79
2.1.	Mano de obra	79
2.2.	Materiales informáticos	80
2.3.	Material fungible	81
2.4.	Equipos del motor	81
3.	CUADROS DE PRECIOS UNITARIOS.....	83
4.	ESTADO DE MEDICIONES Y PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN DE MATERIAL	85
5.	PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN.....	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura [1.1.1]: Porcentaje según el tipo de motor sobre el total de las nuevas matriculaciones en el año 2020 en la Unión Europea. <i>Fuente: ACEA</i>	3
Figura [1.1.2]: Resultado del estudio LCA realizado por <i>NGVA Europe</i>	5
Figura [2.1.1]: Partes de un MEP, motor de combustión interna alternativo. <i>Fuente: ComoFunciona</i>	10
Figura [2.1.2]: Inyección directa e indirecta, motor de encendido provocado. <i>Fuente: Motorgiga</i>	12
Figura [2.1.3]: Fases de un motor de 4T. <i>Fuente: [1]</i>	14
Figura [2.1.4]: Diagrama presión-volumen motor 4T. <i>Fuente: [1]</i>	15
Figura [2.2.1]: Fases de combustión en un MEP. <i>Fuente: [1]</i>	16
Figura [2.3.1]: Micro-encendedor láser con tres rayos de salida. <i>Fuente: [6]</i>	20
Figura [2.4.1]: Dispositivo que sustituye a la bujía convencional en el sistema TJI. <i>Fuente: [9]</i>	22
Figura [2.4.2]: Sistema de encendido por precámara de tipo pasivo (a la izquierda) y activo (a la derecha). <i>Fuente: [7]</i>	23
Figura [3.1.1]: Esquema de la posición del sistema TJI en el motor. <i>Fuente: [14]</i>	26
Figura [3.1.2]: Disposición completa de la celda de prueba donde se aloja el motor. <i>Fuente: [13]</i>	27
Figura [3.2.1.1]: Modelo completo del motor experimental en GT-POWER.....	30
Figura [4.2.1]: Calibración del modelo en GT-POWER. A la izquierda operando sin EGR y a la derecha con un 15% de EGR.....	38
Figura [4.3.2.1]: Liberación de calor experimental operando con gasolina y la PC1 montada en cada punto de funcionamiento.	43
Figura [4.3.3.1]: Mapas de gasto másico a la izquierda y velocidad del chorro a la derecha frente al volumen de la precámara y el diámetro de los orificios para la gasolina a alta carga/régimen.....	45
Figura [4.3.3.2]: Mapas de máxima cantidad de momento a la izquierda y t^* a la derecha frente al volumen de la precámara y el diámetro de los orificios para la gasolina a alta carga/régimen.....	46
Figura [4.3.3.3]: Mapas de máxima cantidad de momento a la izquierda y t^* a la derecha frente al volumen de la precámara y el diámetro de los orificios para el gas natural a alta carga/régimen.....	47
Figura [4.3.3.4]: Mapas de máxima cantidad de momento a la izquierda y t^* a la derecha frente al volumen de la precámara y el diámetro de los orificios para el metanol a alta carga/régimen.	48
Figura [4.3.3.5]: Perfiles de la cantidad de momento para gasolina a la izquierda y amoniaco a la derecha a alta carga/régimen para una geometría de precámara de 1600mm^3 y 1.4mm de diámetro de orificios.	49
Figura [4.3.4.1]: Mapas de máxima cantidad de momento a la izquierda y t^* a la derecha frente al volumen de la precámara y el diámetro de los orificios para la gasolina a baja carga/régimen.....	50

Figura [4.3.4.2]: Mapas de máxima cantidad de momento a la izquierda y t^* a la derecha frente al volumen de la precámara y el diámetro de los orificios para el gas natural a baja carga/régimen.	51
Figura [4.3.4.3]: Mapas de máxima cantidad de momento a la izquierda y t^* a la derecha frente al volumen de la precámara y el diámetro de los orificios para el metanol a baja carga/régimen.	52
Figura [4.3.4.4]: Figuras de penetración de los casos a alta carga/régimen a la izquierda y baja carga/régimen a la derecha para el metanol.	52
Figura [4.3.4.5]: Perfiles de la cantidad de momento para gasolina a la izquierda y amoniaco a la derecha a baja carga/régimen para una geometría de precámara de 1600mm^3 y 0.8mm de diámetro de orificios.	53
Figura [5.2.1.1.1]: Mapas de máxima cantidad de momento a la izquierda y t^* a la derecha frente al volumen de la precámara y el diámetro de los orificios para el gas natural a alta carga/régimen con un sistema avanzado de encendido.	58
Figura [5.2.1.1.2]: Figuras de penetración de los casos con un sistema avanzado de encendido de alta energía a la izquierda y con bujía convencional a la derecha a alta carga/régimen para el gas natural.	59
Figura [5.2.1.1.3]: Perfil de la cantidad de momento para amoniaco a alta carga/régimen para una geometría de precámara de 1600mm^3 y 1.4mm de diámetro de orificios con un sistema avanzado de encendido.	60
Figura [5.2.1.1.4]: Mapas de máxima cantidad de momento a la izquierda y t^* a la derecha frente al volumen de la precámara y el diámetro de los orificios para el amoniaco a alta carga/régimen con un sistema avanzado de encendido.	61
Figura [5.2.1.2.1]: Mapas de máxima cantidad de momento a la izquierda y t^* a la derecha frente al volumen de la precámara y el diámetro de los orificios para el gas natural a baja carga/régimen con un sistema avanzado de encendido.	62
Figura [5.2.1.2.2]: Perfil de la cantidad de momento para amoniaco a baja carga/régimen para una geometría de precámara de 1600mm^3 y 0.8mm de diámetro de orificios con un sistema avanzado de encendido.	63
Figura [5.2.1.2.3]: Mapas de máxima cantidad de momento a la izquierda y t^* a la derecha frente al volumen de la precámara y el diámetro de los orificios para el amoniaco a baja carga/régimen con un sistema avanzado de encendido.	64
Figura [5.2.2.1]: Mapas de máxima cantidad de momento a la izquierda y t^* a la derecha frente al salto de la chispa (Spark Timing) y la duración de la combustión en la precámara (Combustion duration) para la gasolina a baja carga/régimen.	65
Figura [5.2.2.2]: Mapas de gasto másico a la izquierda y velocidad del chorro a la derecha frente al salto de la chispa y la duración de la combustión en la precámara para la gasolina a baja carga/régimen.	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales especificaciones del motor.	26
Tabla 2. Geometría de la precámara PC1.	33
Tabla 3. Características de los combustibles empleados.....	34
Tabla 4. Características de los puntos de funcionamiento estudiados.....	34
Tabla 5. Matriz de simulaciones modificando el volumen de la precámara y diámetro de los orificios (DOE1).	35
Tabla 6. Características generales de los puntos de funcionamiento utilizados en la etapa de validación.	38
Tabla 7. Comparación de varios parámetros importantes tras la calibración del modelo.....	39
Tabla 8. Velocidades laminares (m/s) de cada combustible a una temperatura de 900K y a distintas presiones.	41
Tabla 9. Matriz de simulaciones modificando la duración de la combustión en la precámara y el salto de la chispa (DOE2).	65
Tabla P1. Cuadro de precios básicos de la mano de obra.	79
Tabla P2. Amortización equipos informáticos.	80
Tabla P3. Cuadro de precios básicos de los materiales informáticos.	81
Tabla P4. Cuadro de precios básicos del material fungible.	81
Tabla P5. Amortización equipos del motor.....	82
Tabla P6. Cuadro de precios básicos de equipos del motor.	83
Tabla P7. Planteamiento del proyecto.....	84
Tabla P8. Adquisición de conocimientos en GT-POWER.	84
Tabla P9. Simulaciones experimentales para la calibración de modelos.	84
Tabla P10. Simulaciones realizadas en GT-POWER para la parte de resultados.	85
Tabla P11. Revisión bibliográfica y escrito final del documento.	85
Tabla P12. Estado de mediciones y Presupuesto de Ejecución de Material (PEM).	86
Tabla P13. Presupuesto Base de Licitación.....	86

Documento I

MEMORIA

1

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

CONTENIDOS

- 1.1. CONTEXTO GLOBAL, PROBLEMA Y ALTERNATIVAS
- 1.2. JUSTIFICACIÓN Y MOTIVACIÓN
- 1.3. OBJETIVOS
- 1.4. VIABILIDAD
- 1.5. ESTRUCTURA DEL TRABAJO

1.1. CONTEXTO GLOBAL, PROBLEMA Y ALTERNATIVAS

Cuando se habla de un Motor de Combustión Interna Alternativo (MCIA), se habla de una máquina capaz de aprovechar la energía térmica de un fluido compresible en energía mecánica, obteniéndose esta energía térmica a partir de la energía química contenida en dicho fluido tras un proceso de combustión. Estos han sido fundamentales en el sector de la automoción reflejando esta energía mecánica en el movimiento de todo tipo de automóviles a lo largo de ya una larga historia que se puede considerar que comenzó en el año 1876 cuando *Nicolaus Otto (1832-1891)* patentó el primer modelo de un motor de 4 tiempos (4T) [1].

En estos más de 100 años de historia, este tipo de máquinas térmicas han sufrido innumerables cambios para ir adaptándolos a las diferentes épocas. Siempre han ido evolucionando según las necesidades. La investigación y desarrollo en este campo ha sido muy extensa a lo largo de su historia. A día de hoy, sigue siendo un estudio que no está finalizado y al que se sigue contribuyendo en gran medida, para seguir aportando mejoras o soluciones a problemas.

Hoy en día, se está enfrentando a un grave problema, al cual se le está intentando dar solución, como es la contaminación. La emisión de gases de efecto invernadero, como el CO₂, va en aumento en los últimos años y el sector de transporte tiene que luchar contra ello. Es un sector que es responsable de aproximadamente un 20% de la producción de este CO₂ [2].

La normativa en cuanto a las emisiones es cada vez más restrictiva para ajustarse al problema que existe e intentar darle solución. Por lo tanto, ante este problema llevan años surgiendo nuevas alternativas a los MCIAs por las que se está apostando y a las que se está dedicando mucho tiempo de investigación. Sin embargo, aún les queda un largo camino por recorrer y a día de hoy siguen estando muy por debajo en demanda y producción.

En este sentido se puede hablar de tecnologías [3, 4] como la introducción de motores eléctricos en los vehículos o la utilización de otro tipo de combustibles como el gas natural comprimido (GNC) [12, 14, 15], biocombustibles, amoníaco o hidrógeno. Todo ello para contribuir a reducir la huella de los gases de efecto invernadero.

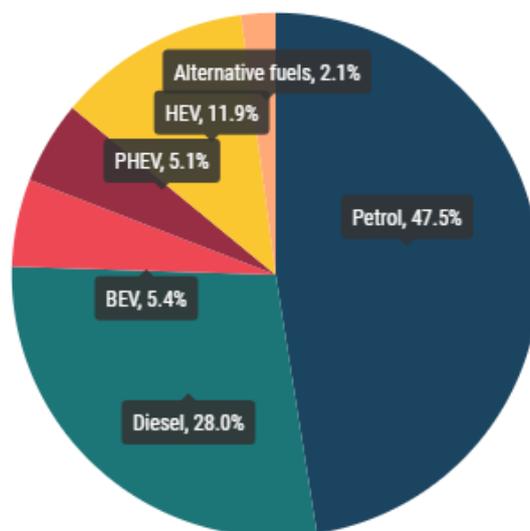
Por un lado, la introducción de los motores eléctricos lleva desarrollándose a lo largo de los últimos años y puede verse como una solución clara al problema. Utilizando electricidad para mover el vehículo en vez de energía térmica no habría expulsión de gases por el tubo de escape que conocemos de un vehículo con un MCIÁ. En principio, las emisiones se irían a cero, lo que supondría acabar con el problema. Pero esto no ocurre así analizando todo el proceso que se recorre para alcanzar esta energía eléctrica, como se verá a lo largo del apartado.

New cars in the EU by fuel type

% SHARE / 2017 - 2020



■ Petrol ■ Diesel ■ Battery electric ■ Plug-in hybrid ■ Hybrid electric ■ Alternative fuels



Created with LocalFocus

Source: ACEA

Figura [1.1.1]: Porcentaje según el tipo de motor sobre el total de las nuevas matriculaciones en el año 2020 en la Unión Europea. *Fuente: ACEA*

Sin embargo en la figura anterior (1.1.1), se ve como este tipo de vehículos, desde el eléctrico puro (BEV), el cual sólo dispone de uno o varios motores eléctricos; híbrido convencional o no enchufable (HEV), el cual funciona también con uno o varios motores eléctricos a lo que le suma un MCIA, pero en el cual las baterías de la parte eléctrica se recargan gracias a un sistema de recuperación de energía en las frenadas; hasta el híbrido enchufable (PHEV), que dispone de los mismos elementos que el HEV, pero en este caso como su nombre indica las baterías se recargan enchufándolas a un punto de recarga; todos ellos, aún no suponen grandes cotas de mercado con bajos porcentajes respecto a los MCIA, ya sean de encendido provocado (MEP) o encendido por compresión (MEC).

Así pues, aunque parece tener ventajas muy grandes el motor eléctrico, sigue teniendo otras desventajas como son la baja autonomía y la ausencia aún de suficientes recursos en cuanto a estaciones de recargas de baterías. Además esto supondría un gran aumento de la demanda de electricidad, a la que hoy en día no podrían responder las plantas generadoras actuales. Sobre estos inconvenientes se está trabajando pero aún queda camino por recorrer y uniéndose a ellas el precio elevado que suelen tener estos modelos de automóviles hacen que, a día de hoy, siga sin despegar del todo esta tecnología.

Además, es un error considerar como ha sido mencionado anteriormente que las emisiones de este tipo de vehículos, incluso aquellos con sólo motores puramente eléctricos, sean cero. La producción de electricidad proviene en un alto porcentaje de sistemas de cogeneración en plantas térmicas, lo cual genera también emisiones de CO₂. Esta producción de electricidad, junto con la de calor, suponen aproximadamente un 40% [2] de la producción total de este gas de efecto invernadero. Este porcentaje de contribución al problema es el doble que el que ha sido visto que supone el sector de transporte. Por lo tanto, ahora se puede ver que es necesario un estudio sobre la contaminación de este tipo de tecnología.

En la siguiente figura (1.1.2), queda reflejado un estudio de Evaluación del Ciclo de Vida, o LCA por sus siglas en inglés (*Life Cycle Assessment*), realizado por *NGVA Europe* [5]. Con este se pretende realizar un estudio más completo de las emisiones asociadas a cada una de las diferentes tecnologías de vehículo. Por lo tanto, en esta evaluación se quiere ir más lejos de un simple WTW (*Well-to-Wheel, del pozo a la rueda*) el cual se puede separar en dos estudios diferenciados. Por un lado, se tiene en cuenta el proceso de producción de la forma de energía correspondiente del vehículo y su camino hasta este (WTT, *Well-to-Tank, del pozo al tanque*). Y por el otro, se evalúa la utilización de dicha forma de energía por el propio vehículo, además de sus propias características en cuanto a la contaminación (TTW, *Tank-to-Wheel, del tanque a la rueda*). El estudio LCA busca ir más allá estudiando también el propio proceso de fabricación de cada una de las partes de este automóvil junto con su situación al final de su vida útil, teniendo en cuenta, por ejemplo, el reciclaje de materiales. En el caso de los automóviles con motores eléctricos, el desecho/reciclaje de sus baterías al final de su vida útil supone también un problema para el medio ambiente.

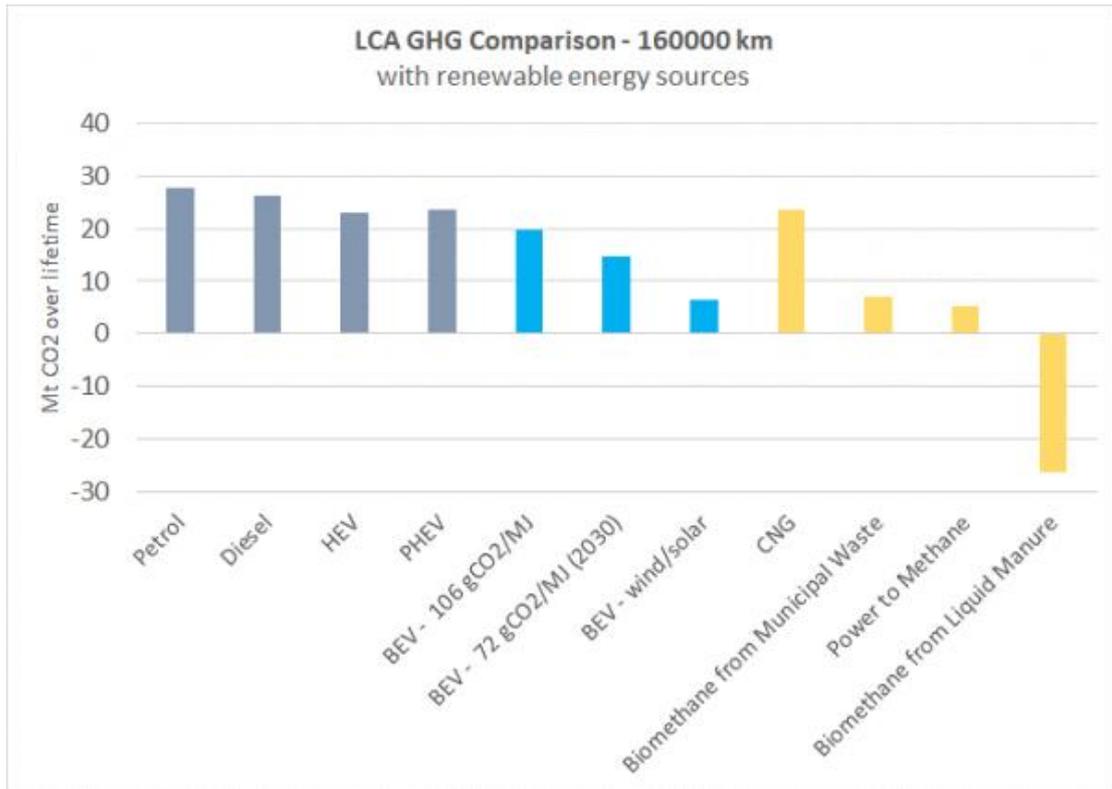


Figura [1.1.2]: Resultado del estudio LCA realizado por *NGVA Europe*

La figura refleja el resultado del estudio anterior en megatoneladas emitidas de CO₂ a lo largo de la vida útil según la tecnología empleada. Exceptuando los vehículos eléctricos puros cuya electricidad proviene de sistemas eólicos/solares y los que utilizan biocombustibles de algún tipo (son muy poco comunes, con apenas cota de mercado hoy en día), se obtienen huellas de CO₂ de cada tipo de tecnología muy similares. Algunas de estas que han sido comentadas como la hibridación o la utilización de GNC como combustible no rebajan demasiado la huella de los motores gasolina o diesel.

Así pues, llegados a este punto se ve como trabajar sobre los MCIAs tiene mucho sentido. Estos siguen ocupando los puestos más altos con gran diferencia frente a otras tecnologías y además, sigue habiendo un gran margen de mejora. Investigando y desarrollando sistemas que permitan mejorar el rendimiento, que a su vez derivarán en una reducción de las emisiones contaminantes, se puede llegar a soluciones de futuro muy satisfactorias.

Como consecuencia, este trabajo se ha enfocado en esta última parte trabajando sobre el diseño y desarrollo de un nuevo concepto de sistema de ignición para motores de encendido provocado. Este nuevo concepto recibe el nombre de encendido por precámara pasiva o encendido por chorro turbulento, en inglés conocido por las siglas TJI (*Turbulent Jet Ignition*) y es un sistema muy prometedor para conseguir combustiones más eficientes y hacer frente con grandes garantías a la problemática actual desarrollada a lo largo del actual punto.

Por ello, a partir de ahora el presente trabajo se va a centrar en los MCI, concretamente en los MEP, para acabar desarrollando en detalle el sistema de ignición TJI con el objetivo de optimizar dicho sistema al máximo.

1.2. JUSTIFICACIÓN Y MOTIVACIÓN

Ante la problemática del aumento de emisión de gases de efecto invernadero y contaminantes a la atmósfera, la normativa que se está aplicando al sector automovilístico es cada vez más restrictiva. Como consecuencia, este sector se tiene que adaptar a esta época en una inversión de esfuerzo por lograr mejorar los sistemas existentes, tanto para cumplir esta normativa, como por el compromiso de ayudar a la sociedad en esta necesaria tarea.

Ante esto, la mirada de este proyecto está puesta en los MCI, aquellos cuyos vehículos que los adoptan siguen ocupando los puestos más altos de demanda. Más particularmente, los MEP han demostrado tener un gran margen de mejora. Es por ello, que la investigación y desarrollo de sistemas que ayuden a lograr un mejor rendimiento en este tipo de motores, con ello reduciendo el consumo y la emisión de CO₂, además de otras sustancias contaminantes, es una gran motivación para llevar a cabo este estudio.

En este momento cabe destacar la labor del Instituto Universitario CMT-Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia como Centro de Investigación durante ya un periodo de más de 40 años. Su contribución a lo largo de su ya amplia trayectoria a la Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) de los motores de combustión interna alternativos, uno de los muchos campos que abarca este departamento, ha sido muy importante. Su compromiso para ayudar a la sociedad y al medio ambiente es intachable.

Con todo ello, la aparición en los últimos años de un nuevo concepto de sistema de encendido por precámara de tipo pasivo para los motores de encendido provocado ha arrojado una luz esperanzadora con la vista puesta en el futuro más inmediato. Este mencionado sistema, utilizando un concepto de encendido por chorros turbulentos, está arrojando resultados positivos en cuanto a una mayor rapidez de la combustión, mejora de su eficiencia y posibilidad de diluciones de la mezcla (ya sea mediante aire [12, 13] o gases de escape recirculados, EGR [14, 15]) o incluso con combustibles que no sean gasolina, como puede ser el gas natural comprimido, metanol o amoníaco, con características beneficiosas en cuanto a las emisiones que producen. Estas estrategias pueden resultar muy importantes para la lucha contra el constante aumento de la contaminación que nos atañe hoy en día.

Por todo ello, la motivación del presente trabajo está en el compromiso con la preocupación que envuelve a la sociedad hoy en día, viendo en el concepto TJI una alternativa de futuro. Desarrollar y optimizar un sistema que con suficientes garantías se pueda llevar a los motores de los vehículos del futuro, en competencia en relación al precio con los existentes. Asimismo, teniendo como resultado unas emisiones más limpias, sin afectar a su vez a los logros obtenidos hasta la fecha en cuanto a rendimiento o potencia, pudiéndose incluso mejorarlos.

1.3. OBJETIVOS

Muy ligado al apartado anterior, se puede marcar un objetivo general como el estudio del encendido por precámara de tipo pasivo en un motor de encendido provocado. Se pretende entenderlo y examinar sus puntos fuertes y, también, débiles, tanto en cuanto a las prestaciones como a las emisiones contaminantes. Se acometerá este estudio con la idea de demostrar que este sistema de encendido puede ser una de las claves de los MEP en el futuro.

Este objetivo, por supuesto, es resultado de una sucesión de propósitos más reducidos y específicos, los cuales son muy importantes evaluar paso a paso para alcanzar la meta final y que se definen a continuación:

- En una visión más teórica, el primer objetivo es la comprensión de los MCIA, concretamente los MEP, ya que es en estos donde se pretende implementar el sistema de encendido por precámara del tipo pasivo. Por lo tanto, seguidamente será necesario entender, desarrollar y diseñar dicho método de encendido.
- Implementar diferentes combustibles al sistema, como el gas natural comprimido, metanol y amoníaco, además de gasolina usualmente utilizado para estos MEP, con el propósito de realizar una comparación de resultados en todos ámbitos entre ellos.
- Mejorar la respuesta del concepto TJI, gracias al efecto de sustituir/mejorar la bujía convencional mediante sistemas de ignición alternativos que aporten soluciones a posibles inconvenientes que surjan del método de encendido por precámara de tipo pasivo.
- Dentro de los dos objetivos anteriores, hay que hacer mención a la importancia de encontrar geometrías de precámaras con las que se consigan resultados satisfactorios en el mayor rango posible de puntos de funcionamiento.

1.4. VIABILIDAD

Partiendo de la necesidad de adaptar los MCIA a las restricciones en cuanto a emisiones contaminantes por las que se están viendo afectados en la actualidad, se antoja imprescindible llevar a cabo investigaciones en este campo. Los motores del futuro, para combatir su sustitución por otras alternativas, deberán albergar inevitablemente cambios. Además, como se ha visto anteriormente, se trata de motores con un amplio margen de mejora y que incluso en su situación actual no son mucho más problemáticos en cuanto a la cuestión de la contaminación que las dichas alternativas que están apareciendo.

Por otro lado, teniendo en cuenta la disposición de instalaciones experimentales y herramientas teóricas suficientes para llevar a cabo el trabajo (explicadas en capítulos posteriores) y conociendo de los resultados prometedores que ha arrojado el sistema a evaluar en estudios anteriores, hace pensar que se trata de una investigación muy viable desde todos los aspectos.

Además, es importante mencionar, aunque no es objetivo del presente trabajo, que de cara a una implementación de este sistema de encendido por precámara de tipo pasivo para MEP en el mercado, se trata de un concepto que no supone unos costes demasiado elevados frente a los motores existentes. En principio, se presupone capaz de introducirse en él con grandes garantías para adaptar los vehículos, de cualquier gama, a las necesidades actuales.

1.5. ESTRUCTURA DEL TRABAJO

El presente trabajo partió de la identificación del problema mencionado en los puntos anteriores. A partir de este momento, comenzó un proceso largo que condujo hasta la redacción de este documento final. Durante el desarrollo, se han llevado a cabo distintas actividades.

Inicialmente, se comenzó por una documentación bibliográfica para adquirir los conocimientos necesarios. Tras ello, fue importante definir la cuestión a resolver, así como los objetivos del estudio. A esto le siguió una comprensión de los conceptos teóricos esenciales para poder entender el sistema objeto del análisis y los resultados obtenidos. En este momento, se estuvo preparado para la utilización de las herramientas disponibles y así, llevar a cabo los estudios necesarios e interpretar los resultados.

Como parte final del proyecto, tras alcanzar los resultados marcados en los objetivos, se encuentra el presente documento para reflejar todas las partes realizadas. Este se divide en dos partes diferenciadas como son una memoria y un presupuesto.

La memoria a su vez se encuentra dividida en 6 capítulos. El primero de ellos sirve de una introducción al problema, así como para marcar los objetivos. El capítulo 2 y el 3 contienen las explicaciones necesarias de los conceptos teóricos básicos y las herramientas utilizadas, respectivamente. Tras estos, se encuentran los capítulos 4 y 5, en los que se presentan los resultados obtenidos en los distintos estudios para terminar con el capítulo 6 de conclusiones obtenidas a lo largo de todo el trabajo.

El segundo documento, el presupuesto, fue necesario finalmente para recopilar los recursos empleados y evaluarlos económicamente.

2

CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

CONTENIDO:

- 2.1. MCIA: DIFERENCIAS MEP Y MEC
- 2.2. MEP: CONCEPTO Y MEJORA DE COMBUSTIÓN
- 2.3. SISTEMAS AVANZADOS DE ENCENDIDO DE ALTA ENERGÍA EN MEP
- 2.4. SISTEMA DE ENCENDIDO POR PRE-CÁMARA. TJI

2.1. MCIA: DIFERENCIAS MEP Y MEC

Aunque echando la vista unos años atrás, el futuro del motor de combustión interna alternativo parecía no estar muy claro, a día de hoy, más de 100 años después de su aparición, su papel en el sector de automoción sigue siendo fundamental. Está presente en casi el 95% de los vehículos que se matriculan cada año como se ha visto en la figura 1.1.1 anteriormente.

El MCIA [1] consiste de un dispositivo capaz de transformar la energía térmica contenida en un fluido compresible en energía mecánica. Esta energía térmica se obtiene a partir de la energía química almacenada en un material, el cual generalmente es un combustible, como puede ser la gasolina y el diesel. Esta última parte ocurre tras un proceso que recibe el nombre de combustión, y como indica el nombre de este tipo de motores, tiene lugar en el propio fluido, una mezcla del dicho combustible y aire en adecuada proporción. Igualmente, como indica su nombre, en estos MCIA el fluido genera un trabajo sobre una superficie móvil, el pistón de un cilindro, el cual desarrolla un movimiento alternativo.

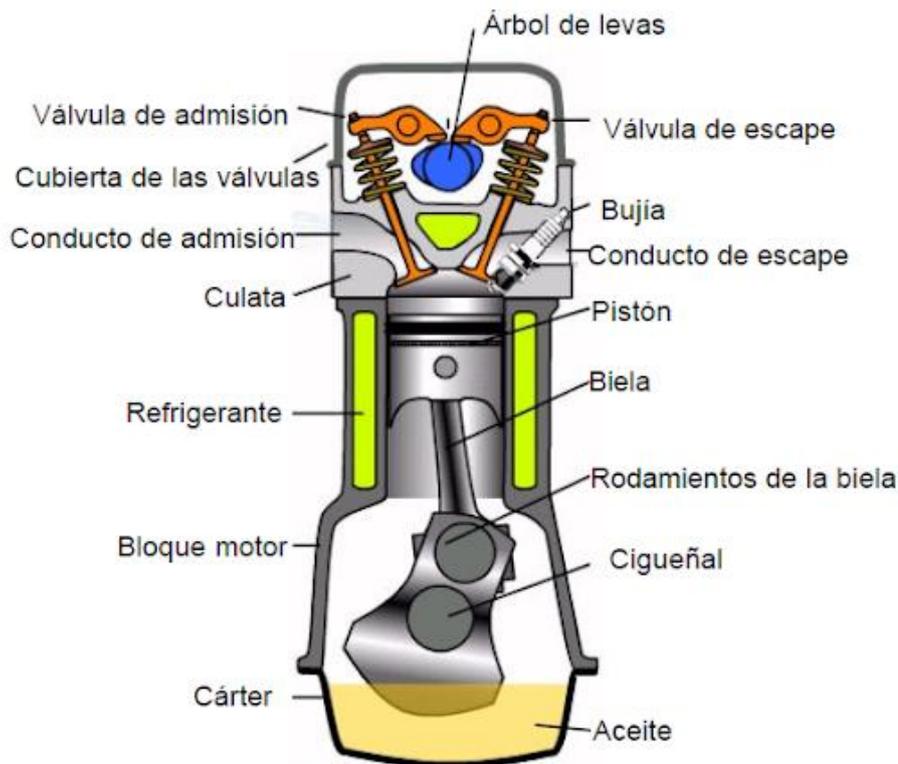


Figura [2.1.1]: Partes de un MEP, motor de combustión interna alternativo. *Fuente: ComoFunciona*

Estos motores han dominado a lo largo de los años en su implementación en automóviles. Esto es gracias a grandes ventajas como su amplio rango de actuación en términos de régimen y carga con rendimientos aceptables en todos los puntos o su adaptabilidad a diferentes aplicaciones que requieran más o menos potencia, desde rangos de pocos vatios hasta incluso megavatios. Además, es de destacar su posibilidad de trabajar con varios tipos de combustibles hasta de diferentes naturalezas.

Por otro lado, el MCI también presenta algunos inconvenientes como su limitación en potencia máxima o potencia específica que los elimina de aplicaciones como centrales eléctricas o aeronaves, respectivamente. Pero el mayor problema, ya tratado a lo largo del capítulo 1, es la emisión de gases contaminantes. Sin embargo, como se ha visto, considerando un proceso completo de la energía total, y no sólo la utilización final del motor, no lo distancia demasiado de otras alternativas que han surgido en los últimos años como los motores eléctricos. Adicionalmente, como se ha presentado anteriormente y se harán menciones posteriormente, estos motores y más en concreto hablando de un MEP, objeto del presente estudio, son compatibles con otro tipo de combustible a la gasolina, como puede ser el gas natural, el metanol o el amoníaco, que presentan ventajas en cuanto a una menor emisión de sustancias contaminantes.

Así pues, viendo el gran interés que tiene el estudio en este tipo de motores es necesario clasificarlo en base a algunos criterios. Hay un gran número de posibilidades para clasificarlos, pero aquí se va a atender a las dos principales [1]:

-Según el proceso de combustión:

- Motor de encendido provocado (MEP)

Es el tipo de motor objeto del presente trabajo para implementar el revolucionario concepto de encendido por precámara de tipo pasivo, avanzado anteriormente y desarrollado y explicado con más detalles en capítulos posteriores.

La principal característica que define este motor es que el inicio de la combustión se produce gracias a un aporte externo de energía por mediación de un elemento llamado bujía. Este hace saltar una chispa en el momento adecuado siendo capaz de iniciar el proceso. Tras este encendido, es un frente de llama el encargado de recorrer la cámara de combustión, produciéndose una separación entre dos zonas, una con gases quemados y otra con mezcla fresca.

También llamado motor de encendido por chispa o motor *Otto*, generalmente utilizan un sistema de inyección, quedando ya casi en desuso el carburador. Si la mezcla se realiza fuera del cilindro, en el colector de admisión, se consigue una mezcla homogénea, ya que hay suficiente tiempo para que el aire y el combustible se mezclen perfectamente. Este sistema recibe el nombre de inyección indirecta y, generalmente, ha sido el método más empleado a lo largo de los años. En este caso, con el objetivo de modificar la potencia a un determinado régimen se procede a estrangular la admisión mediante una válvula de mariposa para facilitar la entrada de mayor o menor cantidad de mezcla, ya que la proporción de aire y combustible no es homogénea antes de dicha válvula. Este proceso supondrá un mayor esfuerzo para introducir la mezcla perdiendo rendimiento.

Por otro lado, existe la inyección directa o mezcla estratificada, por la cual, el combustible se inyecta directamente en la cámara de combustión y dependiendo del punto de funcionamiento en el que se esté trabajando se hará de forma distinta. A plena carga, se inyectará el combustible durante la fase de admisión para dar tiempo a mezclarse con el aire y producirse un efecto similar al creado con la inyección indirecta. En contraste, a cargas parciales, este se inyectará durante la carrera de compresión con la intención de que la mezcla se encuentre en dosado rico en las proximidades de la bujía y en dosado más pobre cuanto más nos alejamos de esta. A este tipo de mezcla se le llama mezcla estratificada y la ayudarán a crearse la forma de la cámara, la posición del inyector, etc. Esta estrategia, aproximándose a la de un MEC presentada a continuación, es importante en la eliminación de las importantes pérdidas que se producen a bajas cargas por la válvula de mariposa.

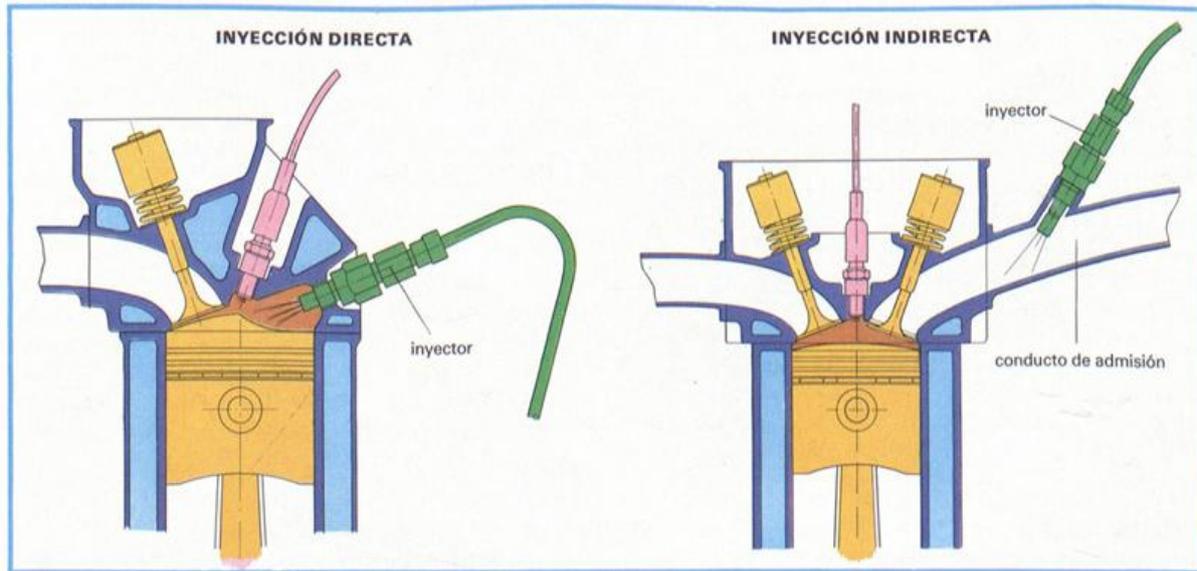


Figura [2.1.2]: Inyección directa e indirecta, motor de encendido provocado. Fuente: Motorgiga

- Motor de encendido por compresión (MEC)

En estos motores no se necesita un aporte externo de energía, sino que la combustión se inicia mediante un proceso de autoencendido al alcanzar condiciones de presión y temperatura adecuadas para ello, tras el proceso de compresión. Para evitar encendidos en puntos muy avanzados, lo que reduciría el rendimiento, el combustible se inyecta al final de la carrera de compresión cuando las condiciones en el aire ya son adecuadas para producirse la combustión.

Por todo ello, la mezcla que se produce es heterogénea y la combustión se inicia en zonas con relación combustible-aire cerca de la estequiométrica (el dosado global se encuentra por debajo del estequiométrico, $Fr < 1$, debido a la dificultad de alcanzar la unidad por el poco tiempo que hay para el proceso y, a su vez, ayuda en un compromiso con el medio ambiente), pudiendo aparecer más de un frente de llama. La regulación en un MEC, a diferencia de un MEP de inyección indirecta, se realiza sin estrangulación, controlando simplemente la cantidad de combustible que se introduce, al trabajar este en un amplio rango de dosados.

Otra diferencia entre este motor y el MEP se encuentra en la relación entre el volumen útil, referido a la carrera recorrida por el pistón, y el volumen de la cámara de combustión y que vemos su ecuación a continuación (2.1.1). Mientras en los MEP esta relación de compresión suele ser menor a 11 por problemas de una posible autoinflamación que veremos en el punto siguiente, en los MEC esta relación debe ser más alta para conseguir mayores presiones y temperaturas en el aire al final de la compresión para un adecuado autoencendido. Esta relación suele tomar valores de entre 15 y 21.

$$Rc = \frac{Vd+Vc}{Vc}, \quad (2.1.1)$$

Cobra en este tipo de motor una importancia especial el inyector, ya que el tiempo para inyectar, evaporizar, mezclar y quemar es muy reducido. El avance de la tecnología en este sentido a lo largo de los años ha permitido elevar mucho las prestaciones de este tipo de motor. En la actualidad, sistemas como el *common rail*, son capaces de inyectar el combustible a una presión muy elevada.

Otras tecnologías empleadas para favorecer este proceso son la utilización de geometrías especiales de la cámara de combustión, lo que nos lleva a poder clasificar estos motores en dos grupos. Por un lado están los MEC de inyección directa en los que la cámara de combustión se encuentra labrada en el pistón y el inyector en el centro de esta. Y, por otro lado, se encuentran los MEC de inyección indirecta, que disponen además de una precámara más pequeña labrada en la culata donde se alberga el inyector y que pueden aumentar la relación de compresión a los valores máximos de 21 comentados anteriormente.

-Según el ciclo de trabajo:

- Motor de dos tiempos (2T)

Este se caracteriza por completar el ciclo en una sola revolución del cigüeñal, es decir, en 360° únicamente tras dos carreras del pistón. Los procesos a realizar, como se verá a continuación, son exactamente los mismos que en el motor de cuatro tiempos. Estos son admisión, compresión, expansión y escape. Sin embargo, la diferencia fundamental que hace que este proceso se complete en una vuelta de cigüeñal, está en el proceso de admisión y escape, los cuales se realizan simultáneamente, denominándose este proceso barrido. En este caso, serán los propios gases frescos los que expulsan a los gases quemados, gracias a provocar que los primeros se encuentren a más presión que los segundos tras la expansión y la apertura de una o varias válvulas de escape o aberturas en el propio cilindro, llamadas lumbreras. En este segundo caso, es el propio movimiento del pistón el que descubre o cierra estas aberturas.

Debido a que completa el ciclo en una sola vuelta de cigüeñal resultaría muy interesante, ya que sería capaz de en igualdad de condiciones entregar el doble de potencia que un motor de cuatro tiempos, teóricamente. Pese a ello, su complicada renovación de la carga y que a igualdad de tamaño para la realización de este proceso de barrido convenientemente pierde un porcentaje de cilindrada, hacen de este un motor que con los años está perdiendo mucho peso.

- Motor de cuatro tiempos (4T)

A diferencia de los motores de 2T, en este caso el ciclo se completa tras dos vueltas del cigüeñal, o lo que es lo mismo, tras cuatro carreras del pistón. Los procesos, como se visualiza en la siguiente figura (2.1.3) son los mismos que se han comentado anteriormente. Es el tipo de motor empleado actualmente, en la mayor parte del sector del transporte, ocupando casi la totalidad de los vehículos que típicamente se conocen.

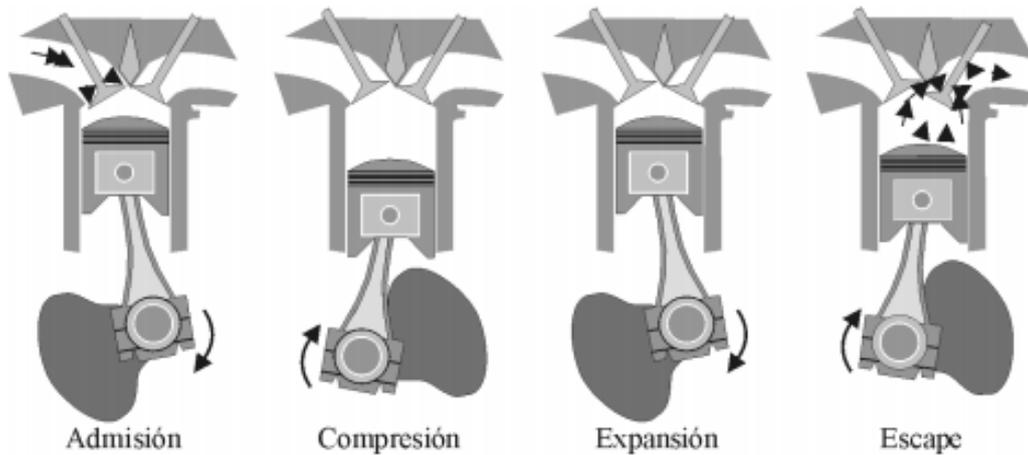


Figura [2.1.3]: Fases de un motor de 4T. Fuente: [1]

Los procesos, explicados de una manera teórica, que tienen lugar son:

- Admisión: el émbolo realiza la primera carrera desde el punto muerto superior (PMS o *TDC* en inglés) al punto muerto inferior (PMI) y con la válvula de admisión abierta y la de escape cerrada se produce la entrada de la mezcla. Una vez el pistón se encuentra en el PMI se cierra la válvula de admisión.
- Compresión: con ambas válvulas cerradas, el émbolo se desplaza desde el PMI al PMS comprimiendo el fluido en el interior. Una vez alcanzado este punto, es el momento donde se inicia y produce la combustión.
- Expansión: carrera desde el PMS al PMI, en la cual el pistón es empujado hacia abajo producto de la combustión produciéndose el trabajo.
- Escape: una vez llegado al PMI tras la combustión se abre la válvula de escape y se desplaza el émbolo de PMI a PMS expulsando los gases quemados. En el momento que este alcanza el punto más alto se cierra la válvula de escape, se abre la de admisión y comienza un nuevo ciclo.

Sin embargo, a este ciclo se le realizan modificaciones debido a la compresibilidad del aire y a que la combustión no se realiza instantáneamente, sino que lleva un pequeño tiempo. Estas modificaciones se basan en avanzar o retrasar ya sea la apertura o cierre de las válvulas o del encendido por medio del salto de la chispa en un MEP o la inyección en un MEC. El tiempo que transcurre con las válvulas de admisión y escape abiertas a la vez se le denomina cruce de válvulas. A continuación se presenta el diagrama presión-volumen de un motor de 4T en la figura 2.1.4.

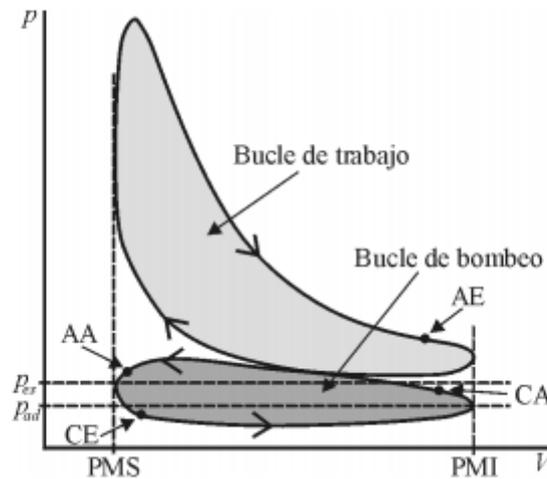


Figura [2.1.4]: Diagrama presión-volumen motor 4T. Fuente: [1]

Hay otras posibles clasificaciones, más secundarias, de este tipo de motor según la presión de admisión (atmosféricos o sobrealimentados), según la refrigeración se produzca por aire o por un líquido, generalmente agua con anticongelante, o según la disposición de los cilindros en el motor: motores en línea, en V, en bóxer (cilindros opuestos) son algunas de las configuraciones más utilizadas.

Por lo tanto, conocidos más a fondo estos MCIA, es importante hablar sobre ventajas e inconvenientes entre los MEP y los MEC, centrándose en un motor de 4T que como ha sido comentado es el ciclo de trabajo utilizado generalmente. Por un lado, debido a que como se ha visto los motores MEP suelen trabajar con un dosado relativo mayor, a igualdad de masa de aire admitida, el MEP quemaría más combustible siempre que no se supere la cantidad estequiométrica, existiendo en ese momento una falta de oxígeno. Además, el proceso de combustión de un MEP no está tan restringido por el poco tiempo que hay como el MEC y es capaz de trabajar a regímenes más altos. Todo ello, provoca que un MEP en condiciones similares a un MEC sea capaz de proporcionar una mayor potencia. Sin embargo, esto se palia debido a la generalización de la sobrealimentación en MEC, que admite mayores grados de ella que un MEP, así consiguiendo introducir mayor masa de aire para quemar más combustible y poder trabajar con potencias similares o incluso mayores a un MEP.

Por otro lado, los MEP presentan el inconveniente de que trabajar con relaciones de compresión más bajas por sus problemas de autoencendido de la mezcla y con dosados relativos mayores da lugar a rendimientos térmicos (η_i) menores, en comparación a los MEC. Esto deriva a que trabajando a igual potencia, el MEP consuma mayor cantidad de combustible y se produzca una mayor emisión de CO_2 al medio ambiente, además de la desventaja que supone para la economía del particular.

En los siguientes capítulos se tratará la mejora de este último aspecto, el cual cuenta con un amplio margen de mejora y puede llevar a soluciones muy satisfactorias con un MEP.

2.2. MEP: CONCEPTO Y MEJORA DE COMBUSTIÓN

Como se ha comentado, en un MEP la combustión comienza por el aporte de energía de un agente externo y generalmente, se encuentra con una mezcla homogénea, a excepción de cuando se trabaja con inyección directa a cargas parciales. El proceso tradicional corresponde a una combustión localizada por deflagración y premezclada, en la cual podemos diferenciar tres fases [1]:

- En una primera fase, tras el salto de la chispa, comienza a avanzar el frente de llama incrementando el volumen de gases quemados, hasta que este es ya importante registrándose cambios en la presión en el interior. Durante esta fase, este frente de llama es pequeño, con carácter laminar. Es decir, la mezcla se encuentra en reposo o con una velocidad muy pequeña, debido a la baja presión y temperatura.
- En la segunda fase el frente de llama es mayor, con carácter turbulento que hace aumentar mucho la velocidad de combustión. Durante esta fase, se quema la mayor parte del combustible y se registra un gran aumento de presión, finalizando al llegar el frente de llama a las paredes de la cámara.
- En la tercera fase, el frente de llama vuelve a tener un carácter laminar. Esta dura hasta que acaba el proceso de combustión.

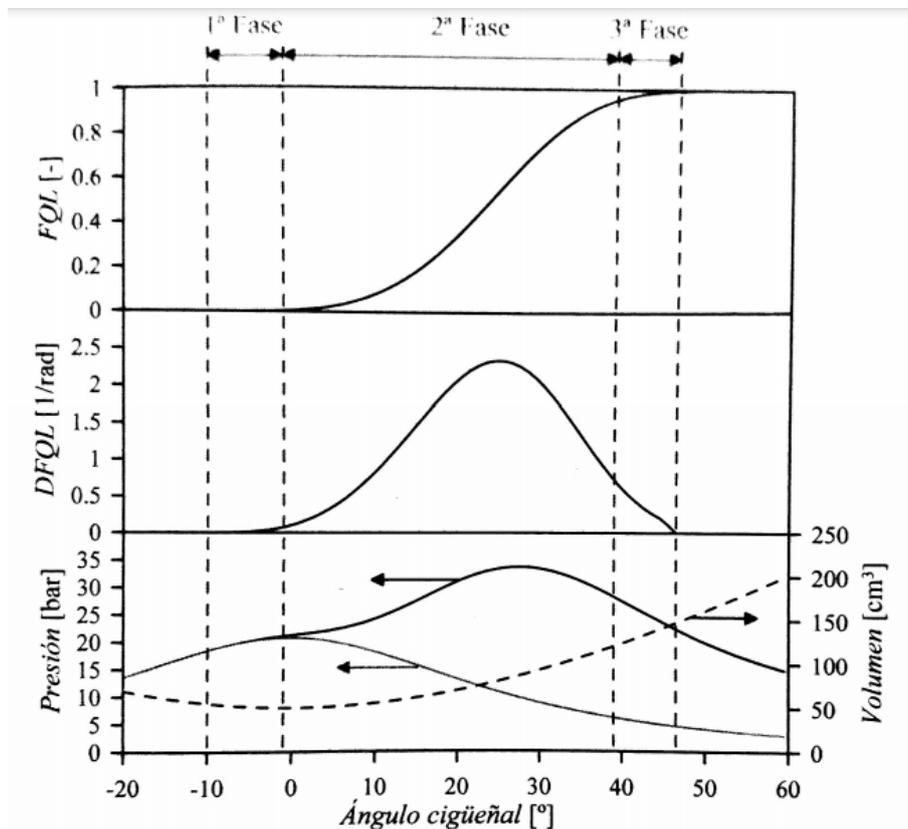


Figura [2.2.1]: Fases de combustión en un MEP. Fuente: [1]

Hay muchos factores que influyen sobre el proceso de combustión. Algunos objetivos para mejorarlo son aumentar la velocidad de combustión aumentando la turbulencia o acortando el recorrido, o reducir pérdidas de calor. La geometría y diseño de la cámara de combustión, la ubicación de la bujía o la relación de compresión pueden afectar dicho proceso. Esto último sería interesante para aumentar la presión y temperatura máximas y obtener un mejor rendimiento térmico en una idea similar a los MEC, pero sin otras mejoras podría llevar a una autoinflamación; que consiste en el autoencendido de una parte de la mezcla a la que no ha llegado el frente de llama, generalmente la más alejada a este, por las altas presiones y temperaturas; o mayores emisiones. Por otro lado, hay factores de operación [1] que se ven a continuación:

- Instante de encendido: Encender la mezcla demasiado pronto lleva a quemar mucho combustible antes del PMS y, por tanto, aumenta la presión y temperatura máximas, pero a su vez se transfiere más calor a las paredes antes del PMS y además aumenta el riesgo de autoinflamación. Por otro lado, hacer saltar la chispa muy cerca del PMS significa alcanzar la presión máxima (más pequeña) muy tarde y no se saca el máximo provecho de la combustión. Esto último ocurriría de igual modo con encendidos demasiado tardíos tras el PMS, con la correspondiente pérdida de prestaciones. Hay que encontrar el punto que optimiza este proceso.
- Régimen de giro: A regímenes altos aumenta la turbulencia y ello influye también en que no sea necesario un avance excesivo del encendido.
- Grado de carga: una menor carga reduce la velocidad de propagación del frente de llama.
- Dosado: Usualmente el dosado relativo en los MEP es 1, necesario para el correcto funcionamiento de un catalizador de 3 vías para el control de las emisiones. Pero la posibilidad de operar con dosados pobres reduce las temperaturas de combustión y, con ello las pérdidas de calor en la cámara.

En el apartado siguiente, se verá la importancia del sistema de encendido en esta mejora del proceso de combustión y, además, para evitar ciertos comportamientos de este que lo perjudican. Por un lado, se encuentran características de los MEP como la dispersión cíclica, que consiste en una variación ciclo a ciclo de la combustión cuando se encuentra el motor funcionando en unas determinadas condiciones. Esto puede ocurrir por las variaciones de condiciones locales que se producen en las cercanías de la bujía en cuanto a dosado y turbulencia y se hace más sensible cuanto menor es la velocidad laminar del proceso, es decir, se acusa en condiciones diluidas. Este comportamiento produce irregularidades en el régimen de giro y en las emisiones y limita la potencia. Además, existe un límite de dilución el cual afectaría a la estabilidad del proceso produciéndose un apagado de la llama, que también puede ocurrir por efecto térmico al acercarse el frente a las paredes.

Por otro lado, hay ocasiones en las que ocurren anomalías que producen un alto riesgo para el motor. Una de ellas es la autoinflamación, conocida también habitualmente por detonación y mencionada anteriormente. Dicho fenómeno produce un rápido aumento de presión, creando tras ello una importante oscilación de alta frecuencia de esta y de temperatura pudiendo afectar a las partes del motor, y un ruido conocido como picado de biela. Otra anomalía es el encendido superficial cuando algún punto caliente de la cámara inicia un frente de llama, con la posibilidad de ocurrir esto en cualquier momento del ciclo.

En cuanto a la autoinflamación, hay muchos factores que le afectan. Con respecto a parámetros de diseño, un aumento de la relación de compresión o menores pérdidas de calor aumentan el riesgo, ya que favorecen la presencia de mayores presiones y temperaturas y la turbulencia o un menor recorrido del frente de llama lo reducen, disminuyendo la duración de la combustión. Por otra parte, el avance del encendido o un mayor grado de carga aumentan el riesgo, un aumento del régimen por un lado aumenta la turbulencia, pero por otro lado disminuye las pérdidas y la dilución con EGR disminuye el riesgo. Además, la utilización de un combustible con mayor número de octanaje implica un aumento de las condiciones de presión y temperatura para autoinflamar y, por tanto, también disminuye el riesgo.

Por último, otro problema del proceso de combustión, importante en la actualidad y comentado a lo largo de todo el presente trabajo es la emisión de gases contaminantes. En un MEP, entre ellos se encuentran, además del CO_2 , el CO y los hidrocarburos (HC), que se asocian a combustiones incompletas con dosados ricos, aunque los HC también crecen con dosados demasiado pobres fuera de los límites de inflamabilidad, y los NO_x que necesitan de altas temperaturas y presencia de O_2 , haciéndose máximos con dosados menores pero cercanos al estequiométrico. En la actualidad, son comunes algunas técnicas para la reducción de estas emisiones. Algunas de ellas, contribuyen a la no formación de estas sustancias (técnicas activas) como el EGR. Al introducir estos gases de escape de nuevo al cilindro se reduce el oxígeno presente en este reduciendo la temperatura alcanzada y, con ello, beneficiando la menor formación de NO_x . Por otro lado, están generalizadas técnicas pasivas que ayudan a la eliminación de sustancias formadas. Entre ellas se encuentran, el catalizador de 3 vías mencionado anteriormente, trampas de NO_x para la eliminación de estos en condiciones pobres donde el catalizador no funciona correctamente o ventiladores de gases en el cárter y en el depósito para evitar emisiones de HC.

2.3. SISTEMAS AVANZADOS DE ENCENDIDO DE ALTA ENERGÍA EN MEP

El futuro de los MEP, con un amplio margen de mejora, pasa por estrategias que mejoren el rendimiento y, con ello se disminuya el consumo, consiguiendo con ello reducir la emisión de gases de efecto invernadero. Como se ha visto algunas de las estrategias para llevar a cabo este progreso son una combustión pobre por dilución con aire o EGR, la estratificación de la carga o mejoras en el proceso de combustión con un aumento de la velocidad de combustión, que incluso permitan aumentos de R_c . Es aquí, donde se antoja fundamental el sistema de encendido para los MEP.

Las estrategias comentadas como las diluciones de la mezcla se comportan muy bien desde el punto de vista de rendimiento y emisiones. Sin embargo, debido a la menor cantidad de combustible respecto de aire, tienen inconvenientes a la hora de encender la mezcla y propagar la llama de manera efectiva a ciertos grados de dilución y según qué puntos de funcionamiento en cuanto a régimen y carga. Además, como se ha visto también se pueden producir altas variaciones de ciclo a ciclo. Todo ello comprometerá el correcto funcionamiento del motor.

Como consecuencia, se están desarrollando sistemas avanzados de encendido que sean capaces de entregar un mayor aporte de energía [6], respecto a la ignición por chispa convencional, para evitar estas inapropiadas situaciones. Típicamente, de una manera sencilla, el sistema de encendido de un MEP se ha compuesto por la bujía (el electrodo que hace saltar la chispa), un transformador de alta tensión necesario para elevar el voltaje entregado por la batería a valores adecuados de kilovoltios que lleguen a la bujía y un sistema de control para controlar los instantes en los que actuar.

Comúnmente, el encendido de la mezcla comienza por un proceso de formación de plasma [6] creando un núcleo de llama, a lo que luego le sigue una descomposición de este y un suministro suplementario de energía para mantener el proceso de encendido. Así pues, los objetivos en la investigación y mejora de estos sistemas de encendido han transcurrido a lo largo de los años hacia la búsqueda de mayores volúmenes de encendido, aumentar el tamaño del plasma, su intensidad, duración y facilitar la interacción de este con la propagación de la llama, o trabajar con múltiples sitios de encendido.

Con todo ello, lo siguiente es hablar sobre las principales tecnologías [6,7] que se han desarrollado a lo largo de los últimos años para mejorar de cara al futuro el sistema de encendido por bujía convencional:

- Encendido por chispa de alta energía:

- ❖ Encendido por descarga capacitiva:

Emplea un condensador acoplado al lado de bajo voltaje del transformador para aumentar moderadamente la energía de encendido. O, también, es posible acoplarlo en el lado de alta tensión mejorando la potencia de descomposición o incrementando significativamente la energía de ignición.

- ❖ Encendido por descarga continua:

Consiste en dos bobinas de encendido inductivo convencionales conectadas a una sola bujía con dos diodos para evitar interferencias de alto voltaje entre ellas. La ventaja de esta configuración es su capacidad de producir una larga duración de descarga continua de chispas.

❖ Encendido por carga múltiple de alta frecuencia:

Gracias a una mayor duración de descarga y a un voltaje de carga más alto en el devanado primario se produce un aumento del volumen del núcleo de encendido para mejorar combustiones en condiciones pobres.

- Encendido por radio-frecuencia:

Se aplica energía alterna de radio-frecuencia y su ventaja es que continuamente se está suplementando energía para el encendido.

- Encendido por corona de radio-frecuencia (ACIS):

Esta tecnología llamó mucho la atención en la investigación a lo largo de los últimos años y aportaba ventajas como un gran volumen de encendido, un suministro continuo de energía y núcleos de llama de múltiples puntos. Debido a su principal característica que consiste en que la cámara de combustión es parte del sistema eléctrico, se produce una aceleración en la propagación de la llama, dando lugar a combustiones más rápidas.

Con todo ello, este concepto ha presentado mejoras en cuanto al aumento del límite de dilución máxima, a la reducción de las variaciones cíclicas y a las menores emisiones de HC a bajas cargas.

- Encendido por plasma por microondas:

La descomposición inducida por microondas se lleva a cabo mediante una técnica llamada resonador de cavidad coaxial de cuarto de onda. Resultados de este sistema han presentado un encendido más rápido trabajando en condiciones pobres. Un desafío en este concepto está en la descomposición del plasma por radiación de microondas, sobretodo a alta densidad del gas.

- Encendido por láser:

Se está apostando por esta tecnología que está presentando combustiones más rápidas y un menor consumo específico de combustible en comparación con el sistema de encendido convencional. Otra importante ventaja de este sistema es la posibilidad de conseguir múltiples puntos de ignición gracias a micro-encendedores láser como el de la figura 2.3.1 con tres rayos de salida.



Figura [2.3.1]: Micro-encendedor láser con tres rayos de salida. *Fuente:* [6]

- Encendido por precámara:

Como se ha visto con anterioridad, es el concepto a desarrollar en el presente trabajo y el capítulo siguiente ayudará a una mejor comprensión del sistema. La utilización de una precámara de combustión ha tenido interés para la investigación desde hace años y presenta resultados prometedores como reducciones en la duración de la combustión y aumentos del límite de combustiones pobres, incluso con reducciones de emisiones de NOx a diferencia de otros sistemas debido a temperaturas alcanzadas más bajas. Por todo ello, merece la pena seguir desarrollando este concepto.

2.4. SISTEMA DE ENCENDIDO POR PRECÁMARA. TJI

El encendido por precámara ha destacado a ser uno de los sistemas avanzados para esta ignición que con más optimismo nos hace mirar hacia el futuro en el contexto de los MCIAs, y en este caso, más concretamente del MEP. Esta tecnología deberá tomar una gran importancia hacia aquellos motores en el que el trabajo en condiciones pobres será fundamental para la tarea de reducir las emisiones y que requieren de sistemas de encendido de alta energía para aprovechar todas sus ventajas y no verse afectado por sus inconvenientes en cuanto al encendido y propagación de la llama.

Esta idea lleva ya muchos años en la mente de los investigadores [7-11] desde que fuera a mitad del siglo XX, 1950, cuando apareciera *Ricardo Dolphin* con un primer concepto de este sistema. Desde dicho momento, se han realizado numerosas investigaciones y variaciones en este campo. El concepto TJI (*Turbulent Jet Ignition*) llega de los investigadores *MAHLE Powertrain* que en 2009 realizaron un estudio en la misma línea que los anteriores con adaptaciones en cuanto a diseños de precámara o la posibilidad de operación con un único combustible, por ejemplo gasolina o gas natural, los cuales son comerciales. Hoy en día, aún queda trabajo por realizar, pero se está más cerca de que esta tecnología llegue a una generación de vehículos no demasiado lejana, proporcionando resultados esperanzadores para combatir la problemática actual.

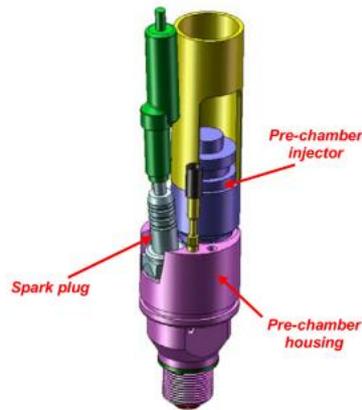


Figura [2.4.1]: Dispositivo que sustituye a la bujía convencional en el sistema TJI. *Fuente:* [9]

Este concepto TJI consiste en un simple reemplazo de la bujía convencional por un cuerpo (figura 2.4.1) que incluye el alojamiento de la precámara, la bujía para el comienzo de la combustión en la precámara y la posibilidad de un inyector adicional dependiendo de si se trata de un sistema activo o pasivo, que será explicado con posterioridad. Algunos de las características de esta tecnología son:

- Volumen de precámara muy pequeño en relación con la cámara principal, que minimice la relación superficie-volumen y, por tanto, disminuya las pérdidas de calor, además de favorecer la combustión de toda la mezcla en su interior, reduciendo las emisiones de HC.
- Precámara conectada a la cámara principal mediante una serie de orificios de pequeño diámetro. El diámetro óptimo estará relacionado al volumen de la precámara con el objetivo de que hacerlo más pequeño facilitará la presurización de la anterior y la mejor penetración de los chorros turbulentos en la cámara principal. Sin embargo, siendo importante evitar poner en riesgo la entrada de mezcla o el vaciado de gases residuales.

Su gran rendimiento frente al sistema convencional reside en la aparición de más de un punto de encendido y la facilidad con la que los chorros barren la cámara principal. La mezcla homogénea introducida al cilindro se comprime por el movimiento del pistón viéndose forzada a entrar, parte de ella, a la precámara por el conjunto de orificios. En su interior se necesita una mezcla dentro de los límites de inflamabilidad para que la bujía convencional sea capaz de encenderla. Mezclas ultrapobres pueden condicionar el buen funcionamiento de la tecnología llegando a límites de dilución máxima. Una vez la mezcla se enciende en el interior de la precámara, unos chorros turbulentos con gran velocidad, productos de la combustión, atravesarán los orificios comenzando la combustión de la cámara principal con las ventajas que tendrá la aparición de múltiples puntos de ignición. La velocidad de combustión será mayor aportando otras ventajas como un mejor centrado o la posibilidad de aumentar la tasa de dilución.

Como ha sido comentado anteriormente podemos diferenciar dos tipos de sistemas de encendido por precámara o chorros turbulentos:

- Sistema activo: Incluye un inyector para un aporte extra de combustible en la precámara y así poder controlar el dosado dentro de esta de una manera muy eficaz, evitando problemas comentados anteriormente. Con este sistema se podrán obtener diluciones mayores de la mezcla, gracias a que en el interior de la precámara se seguirá manteniendo un dosado con suficiente riqueza para realizar la combustión con garantías. La posibilidad de controlar de forma directa el dosado, facilitará mantenerlo este cercano al estequiométrico asegurando una mayor reactividad de los chorros y, por lo tanto, mejorando la ignición de la cámara principal.
- Sistema pasivo: En este caso, no existe dicho inyector y el control del dosado dentro de la precámara se hace más complicado. Se controla indirectamente con el inyector principal y el dosado en ambas cámaras es el mismo. Sin embargo, es un sistema más simple, económicamente más fácil de llevar a cabo y es, por tanto, que el presente trabajo, con el objetivo de no encarecer demasiado los vehículos del momento, se centra en dicho sistema como una apuesta muy interesante.

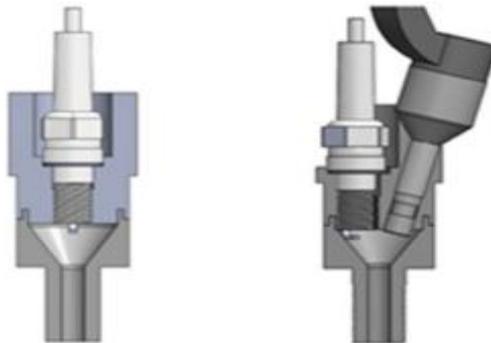


Figura [2.4.2]: Sistema de encendido por precámara de tipo pasivo (a la izquierda) y activo (a la derecha). *Fuente:* [7]

A lo largo de estos años de investigación, encontrando soluciones óptimas en cuanto a diseño y a aspectos geométricos y considerando el punto de funcionamiento, se han hallado numerosas ventajas [7-15] del encendido por precámara de tipo pasivo:

- La principal, y sobre la que giran las demás, es la reducción del tiempo de combustión. Gracias a la producción de múltiples puntos de ignición y la cantidad de momento de estos chorros producto de la combustión en la precámara, se producen combustiones muy rápidas y eficientes.

- Gracias a la característica anterior, se ve reducida la posibilidad de detonación, lo que ayuda a poder lograr R_c mayores y, además, con una combustión más eficiente se reduce la variación ciclo a ciclo.
- Debido a la alta energía para encender la mezcla y a la velocidad de combustión mencionada, tiene una gran capacidad para trabajar con combustiones pobres. Como consecuencia, junto con un posible aumento de R_c , se esperan mejoras en el rendimiento térmico y una reducción en el consumo y, por tanto, en la emisión de CO_2 .
- En la línea anterior, se esperan diluciones máximas mayores que para el sistema convencional, ya sea mediante aire o EGR, y incluso similares a sistemas recientes de encendido por compresión de carga homogénea (HCCI) [8], el cual no necesita bujía y está pensado para trabajar también con mezcla pobre. Sin embargo, el encendido por precámara se prevé capaz de trabajar en todo el abanico de puntos de funcionamiento y su control no es tan complicado.
- Gracias a trabajar con mezclas pobres la regulación se puede realizar mediante la cantidad inyectada de combustible evitando la válvula de mariposa y reduciendo así las pérdidas de bombeo.
- En cuanto a las emisiones, las menores temperaturas alcanzadas trabajando con mezclas pobres reducirá las emisiones de NO_x . Por otro lado, consiguiendo un encendido eficiente de la mezcla en la precámara es también de esperar una reducción de HC y CO , debido a la buena gestión del combustible.
- Este sistema es compatible con otros combustibles. El GNC se muestra como una alternativa a considerar, ya que, aunque sus velocidades de frente de llama son más bajas afectando a la rapidez de la combustión, su contenido en carbono es menor reduciendo así la emisión de CO_2 y su posibilidad de autoinflamación es más baja gracias a su alto número de octanaje. De igual manera, también se puede considerar una alternativa importante la utilización de metanol, pero en este caso incluso pudiéndose aumentar la rapidez de la combustión debido a su mayor velocidad laminar. Sin contenido en carbono (evitando así la emisión de CO_x), el amoníaco también puede verse como una alternativa de futuro importante.
- La implementación de este sistema en su tipo pasivo no se prevé con un coste demasiado elevado.

Sin embargo, como se ha comentado aún queda camino por recorrer. Encontrar diseños de precámaras, y el sistema en conjunto, que optimice el funcionamiento del motor en todo el rango de trabajo se está antojando complicado, pero los resultados son esperanzadores para continuar trabajando en ello.

3

CAPÍTULO 3: HERRAMIENTAS EXPERIMENTALES /TEÓRICAS Y METODOLOGÍA

CONTENIDO:

- 3.1. MOTOR EXPERIMENTAL
- 3.2. GT-SUITE
 - 3.2.1. Modelos GT-POWER
- 3.3. DICOM
- 3.4. MATLAB
- 3.5. METODOLOGÍA

3.1. MOTOR EXPERIMENTAL

El motor experimental del que se obtiene la información necesaria a utilizar en los modelos empleados en GT-POWER (explicado en el punto posterior) se trata de un motor monocilíndrico de encendido provocado de 4T sobrealimentado. Sus principales características y dimensiones se encuentran en la tabla 1.

Como se indica en la tabla, para la renovación de la carga se encuentran 4 válvulas en la culata (DOHC), dos de admisión y dos de escape, para facilitar el vaciado y llenado en el cilindro. El sistema de inyección empleado es PFI (*Port Fuel Injection*), introduciendo el combustible en el colector de admisión cerca de la válvula para una mejor homogeneidad de la carga. El motor opera bajo el ciclo Miller para reducir las pérdidas por bombeo y con una relación de compresión de 12, alta tratándose de un MEP como se vio en el capítulo anterior, pero lo permite una combustión más rápida gracias a la precámara.

Tabla 1. Principales especificaciones del motor.

Diámetro (mm)	75.5
Carrera (mm)	89.26
Desplazamiento (cm³)	400
Relación de compresión	12
Tren de válvulas	DOHC
Sistema de inyección	PFI

En cuanto al ensamblado del sistema de encendido por precámara o TJI en este motor, como se ve en la figura 3.1.1 a continuación, este se aloja en la misma posición que la bujía convencional para facilitar la sustitución de un sistema por otro. Así se podrán realizar distintos ensayos con distintos sistemas para poder establecer comparaciones entre ellos con relativa facilidad.

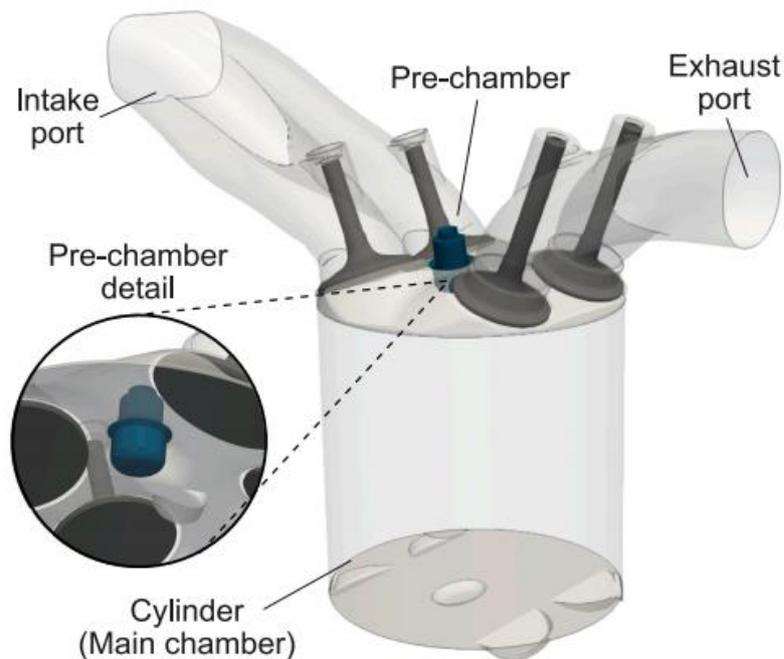


Figura [3.1.1]: Esquema de la posición del sistema TJI en el motor. *Fuente:* [14]

Dicho motor se encuentra ensamblado en una celda de prueba totalmente equipada como muestra su esquema en la figura 3.1.2. Para realizar la sobrealimentación y proporcionar aire a la presión deseada al cilindro se cuenta con un compresor externo. La celda también cuenta con un sistema de EGR (representada en color rojo) para experimentar situaciones con cierta dilución de gases de escape y que es capaz de proporcionar el nivel deseado incluso cuando se opera con una sobrealimentación alta.

La instalación también dispone de tres depósitos (remansos) para mitigar las oscilaciones de presión. Hay una cámara para la admisión de 200L, otra en el escape de 100L y, una más, en la línea del EGR de 50L. Como se puede comprobar también, en la línea de admisión se dispone de un intercooler, que sirve para refrigerar el aire tras la compresión, además de una válvula de mariposa para controlar la carga introducida al cilindro.

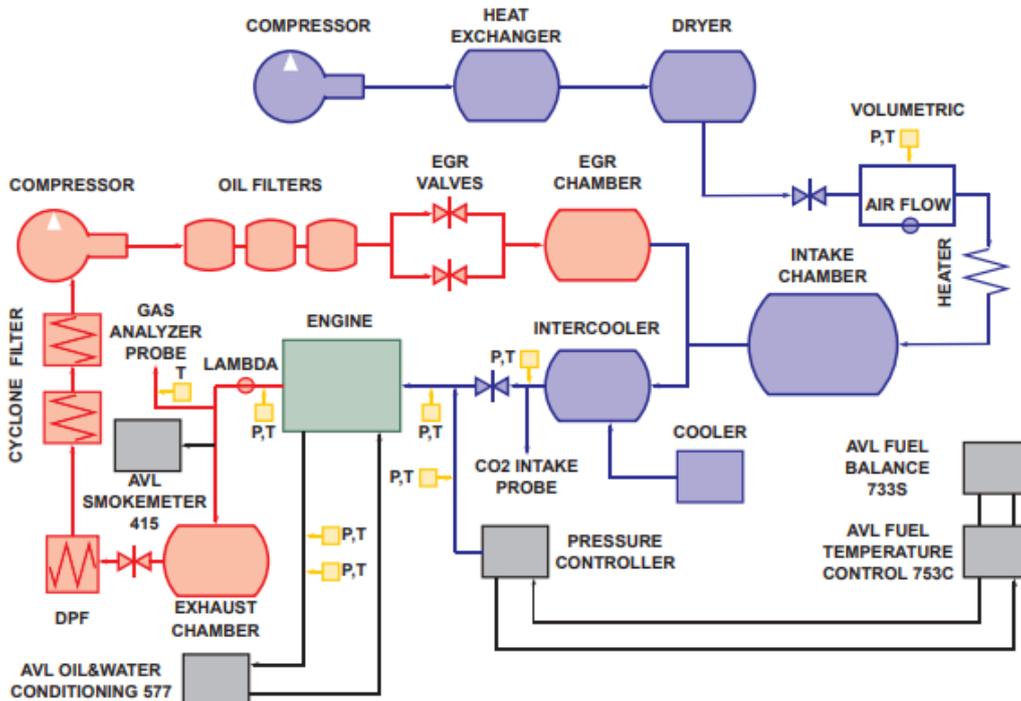


Figura [3.1.2]: Disposición completa de la celda de prueba donde se aloja el motor. Fuente: [13]

También representada en la figura anterior, se encuentra la instrumentación necesaria para poder llevar a cabo la toma de medidas de los parámetros correspondientes para evaluar el comportamiento del motor.

La relación aire-combustible que se encuentra en el interior del cilindro se mide mediante un sensor lambda colocado en el escape. Además, esta medida también se puede realizar a partir del analizador de los gases de escape, HORIBA MEXA 7100 DEGR. A este dispositivo se le envían muestras de los gases que abandonan el cilindro por la línea de escape y toma medidas de las concentraciones de O₂, CO, CO₂, HC y NO_x. Además, también se puede obtener de él una medida de la tasa de EGR con la que se está trabajando.

Por lo tanto, este analizador de gases nos permitirá cuantificar las emisiones a partir de las concentraciones de estas sustancias. Los gases llegan a este a través de una tubería caliente para asegurar que lleguen a temperaturas superiores a 150°C como mínimo. Las emisiones de partículas de hollín, provenientes de trabajar con dosados inferiores al estequiométrico y localizadas por un FSN (*filter smoke number*), se miden mediante un medidor de humos, AVL 415.

Las temperaturas y presiones del aceite y del agua empleados para la lubricación y refrigeración, correspondientemente, son controladas gracias a un acondicionador, AVL 577, que es totalmente independiente del motor.

Por otro lado, también se realizan medidas del combustible inyectado. Dependiendo del tipo de combustible empleado, se utilizan distintos tipos de dispositivos para tomar esta medida. Trabajando con el combustible más típico de un MEP como es la gasolina de 95 octanos (RON95), se emplea un medidor de combustible dinámico gravimétrico, AVL 733. Y su temperatura se controla con un acondicionador, AVL 753. Si por otra parte, se trabaja experimentalmente con gas natural comprimido (con un índice de octano de 120, RON120), se dispone de un caudalímetro, BRONKHORST F-113AC-M50-AAD-44-V, para su medida.

En cuanto a los parámetros globales más destacados, como la presión media indicada efectiva bruta (IMEP), el inicio de la combustión (SoC), fases de la combustión (CA50), duración de la combustión (CA10-90), máxima presión en el cilindro, gradiente de presión, estabilidad de la combustión, la tasa de liberación de calor (HRR) y la temperatura media del gas en el cilindro, son obtenidos a partir de la señal de presión en el cilindro. Esta presión en el interior del cilindro es medida a partir de un sensor piezoeléctrico. Estas señales se muestrean con una resolución de 0,2cad (ángulo de giro del cigüeñal)

Asimismo se disponen de sensores piezorresistivos para medir la presión instantánea en diferentes puntos de la línea de admisión y escape. Se dispone de una gran cantidad de instrumentación que permite experimentar el motor en diferentes situaciones y controlar una enorme cantidad de parámetros para estudiar su comportamiento y realizar los análisis necesarios.

3.2. GT-SUITE

Además de la instrumentación experimental y los ensayos llevados a cabo en esta, se necesita de un software de simulación que, a partir de los datos obtenidos del motor real, nos permita realizar modelos numéricos válidos de este y desarrollar estudios sobre él con una mayor facilidad y menor coste. En este proyecto, va a ser de máxima importancia, cayendo la mayor parte del peso del bloque de resultados sobre él, el software de simulación GT-POWER, el cual se encuentra dentro del paquete GT-SUITE *Engine Simulation Software* de la empresa *Gamma Technologies*.

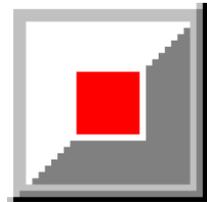


GT-SUITE es un software líder en simulación que cuenta con un conjunto de bibliotecas de componentes capaces de reproducir la física de flujos de fluidos, térmicos, mecánicos, eléctricos, magnéticos, químicos y de control. En lo que al presente trabajo se refiere, interesa su posibilidad de construir modelos muy precisos de motores de vehículos de automoción de todo tipo. Se trata de un referente en la industria del automóvil.

GT-SUITE destaca por su capacidad para adaptar modelos 3D a 1D. Esto resulta en menores tiempos de simulación en comparación a otras herramientas de simulación en 3D y con precisiones en los resultados muy elevadas. Este software a su vez emplea dos aplicaciones, GT-POWER que está enfocada al pre-procesado y que ha sido comentada anteriormente, ya que es fundamental en el presente proyecto y otra llamada GT-POST, ligada a ella también, enfocada a los resultados, post-procesado:

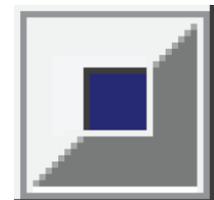
- **GT-POWER:**

Se trata de la aplicación utilizada para llevar a cabo todas las tareas anteriores a lanzar una simulación. Es decir, en ella se realizan las actividades de construcción de los modelos 1D, se declaran las configuraciones de simulación y se lanzan las simulaciones. Generalmente, en ella predeciremos la operación del motor a partir de los resultados experimentales obtenidos del motor real.



- **GT-POST:**

Se trata de una herramienta específica de GT-SUITE dedicada al tratamiento y visualización de los resultados. Se enfoca en el post-procesado y, por lo tanto, es utilizada una vez la simulación ya se ha llevado a cabo. Tiene facilidad para la interpretación de los resultados con capacidad de generar gráficos 2D/3D para ello.



Un software de la importancia de GT-SUITE tiene innumerables puntos a favor y ventajas para su utilización en la investigación y entre ellas podemos destacar:

- La más importante, ya mencionada anteriormente, es la reducción de tiempo en las simulaciones. Es muy importante esta característica en procesos de investigación largos en los que el tiempo es un recurso esencial. Además, es de destacar que un menor tiempo implica a su vez un menor coste.
- Se trata de una herramienta sencilla de utilizar, pero a su vez se obtienen unos resultados muy completos y precisos.
- Capaz de reproducir gran cantidad de modelos diferentes gracias al conjunto de sus bibliotecas y llevar a cabo estudios de distinta índole, incluso matrices de experimentos.
- Permite obtener resultados sobre algunos parámetros que en motores reales serían muy complicados de medir o incluso imposibles, como el momento del chorro.

3.2.1. Modelos GT-POWER

Con los componentes de los que se disponen en el conjunto de librerías de GT-POWER, se consigue crear, como se ha mencionado anteriormente, modelos muy precisos en 1D de cualquier tipo de motor. Para ello, se realizarán conexiones entre los distintos equipos y componentes del sistema, diseñando el esquema de la arquitectura del motor. Una vez llevado a cabo este paso, será importante la calibración de este modelo hasta obtener los resultados requeridos ajustados a los adquiridos del sistema real y poder así validarlo.

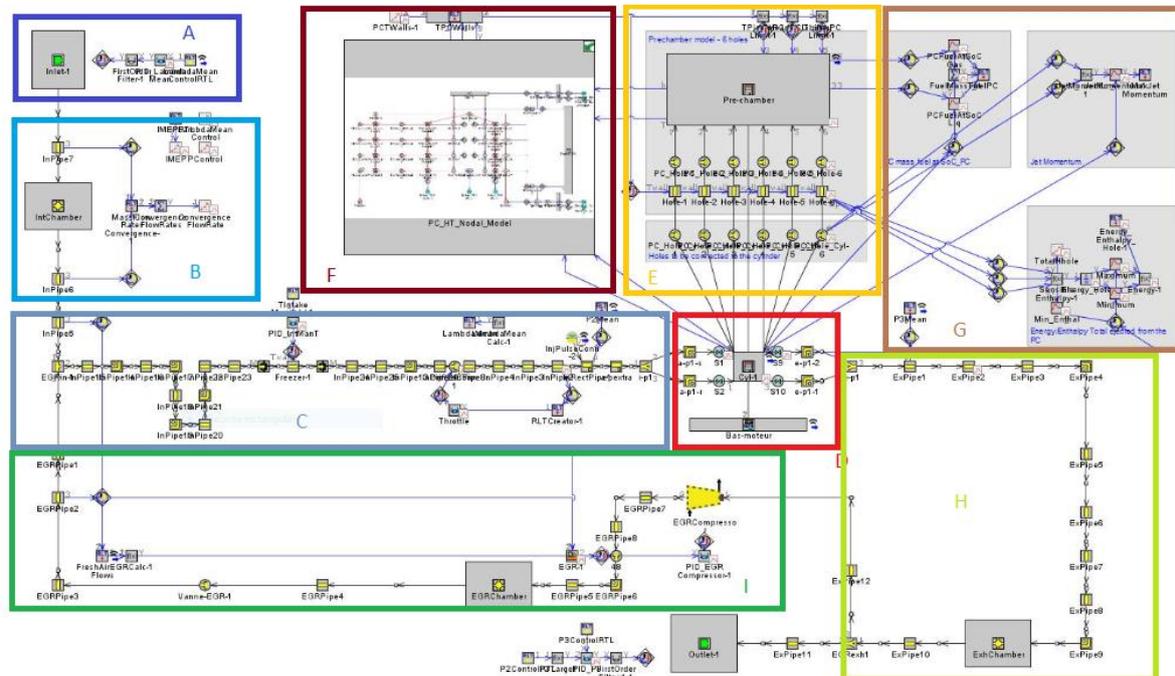


Figura [3.2.1.1]: Modelo completo del motor experimental en GT-POWER.

Para el presente trabajo se cuenta con el modelo del motor experimental (explicado en el punto anterior) representado en la figura 3.2.1.1. A partir de este se podrán configurar casos desde el “Case Setup” o matrices de ellos, en los que se varían algunos parámetros entre determinados rangos, desde “DOE Setup” y lanzar simulaciones obteniendo como resultado el comportamiento del motor. Estos resultados, gracias a ser un modelo válido del motor real, se ajustarán a los logrados experimentalmente y, por lo tanto, se habrán reducido costes. Es decir, centrándose en la investigación del presente proyecto del sistema de encendido por precámara, este software será muy importante en la definición de precámaras de determinadas especificaciones en cuanto a su diseño que aventuren un gran comportamiento antes de fabricarlas y probarlas experimentalmente.

En la figura anterior se ve como el modelo se puede dividir en diferentes secciones para tratar de explicarlo de una manera más sencilla:

- Zona A: En esta parte se establecen las condiciones de admisión del aire.
- Zona B: Aquí se encuentran elementos que trabajan como la cámara de admisión (remanso).
- Zona C: Esta parte se trata de la línea de admisión y todos los elementos que la componen, la válvula de mariposa y el inyector, entre otros.
- Zona D: Simula el cuerpo principal del motor. Esta parte supone el cilindro donde se aloja la cámara principal y las válvulas de admisión y escape.
- Zona E: Es la parte que simula la precámara. Como no hay un componente específico para ellas en GT-POWER estas se componen de un cilindro de pequeño tamaño conectado a la cámara principal mediante una serie de orificios y tuberías.
- Zona F: Se trata de un modelo que se añadió para un cálculo más preciso de las temperaturas en la pared de la precámara durante el ciclo.
- Zona G: Esta parte está dedicada a la obtención de parámetros como la cantidad de movimiento o la cantidad de masa en la precámara al inicio de la combustión.
- Zona H: Se trata de la línea de escape con su cámara.
- Zona I: Línea que simula los gases que se recirculan a la admisión (EGR) con todos los componentes que la componen.

Sin embargo, para las partes de estudios y resultados que se realizarán en los capítulos siguientes se empleará un modelo más reducido al anterior. Al modelo completo se le eliminarán las zonas A, B, C, H e I correspondientes a la admisión y escape del motor y, por tanto, también, la línea de EGR. Se llevará a cabo dicha reducción para disminuir en un mayor grado el coste computacional, ya que para estudios matriciales con una gran cantidad de casos podría ser enorme con el modelo completo. Así el estudio se centrará en la parte de la eyección que se considera la más interesante a la hora de estudiar y comprender el concepto. Se hablará de este prototipo como el modelo simple del motor experimental.

3.3. DICOM

DICOM se trata de un software generado por el departamento CMT-Motores Térmicos y que fue creado para calcular la penetración del chorro libre que atraviesa algunos de los orificios desde la precámara a la cámara principal. Este será capaz de determinar el tiempo que tarda el chorro más alejado en alcanzar la pared del cilindro. Este parámetro será denominado t^* .

Dicho software para determinar la evolución del chorro consiste en un modelo unidimensional, en el cual se asumen ciertas hipótesis que simplifican el cálculo. Necesitará de algunas variables de entrada, obtenidas bien experimentalmente si se disponen de los dispositivos necesarios o bien mediante el modelo en GT-POWER, como el perfil del momento, el perfil del gasto másico, el perfil de presión en la cámara y el perfil de densidad, todos ellos en función del tiempo. Además requerirá del combustible y la concentración másica.

3.4. MATLAB

Matlab consiste en una plataforma de programación y cálculo numérico muy importante en la ingeniería y que a lo largo del presente trabajo ha sido muy utilizada. Destacan en ella sus capacidades de tratar datos en matrices o vectores, representar estos y realizar algoritmos para llevar a cabo determinados propósitos.

Por lo tanto, en el presente estudio de investigación ha sido muy importante en el post-tratamiento de datos para interpretar la información y poder sacar las conclusiones oportunas de una manera más visual y sencilla. Gracias a la implementación de distintos scripts se ha conseguido optimizar mucho el tiempo y a su vez obtener unos resultados de calidad. Se mejora y facilita la visualización de estos mediante el dibujo de gráficas.

3.5. METODOLOGÍA

El primer paso, y del que se parte para llevar a cabo este estudio, es la disposición de las herramientas necesarias descritas a lo largo del actual capítulo. Especial importancia tiene la creación y desarrollo del modelo del motor disponible que permita predecir y analizar este último con menor coste y en un amplio conjunto de parámetros, algunos difíciles o imposibles de obtener experimentalmente. Ya hemos visto que se antoja este modelo clave en un proyecto de este tipo, ya que es de mucha utilidad a la hora de predecir geometrías del elemento clave de este concepto TJI, como son las precámaras, con un comportamiento prometedor antes de construirlas. Por lo tanto, partiendo de la posesión de estos recursos, se lleva a cabo una metodología de trabajo que se detalla en este apartado.

Atendiendo a los objetivos que se han descrito, se van a realizar una serie de simulaciones en GT-POWER y DICOM (apoyándose en datos experimentales) para evaluar el concepto de encendido por precámara de tipo pasivo. Se quiere examinar este sistema con la utilización de diferentes combustibles como son la gasolina, el gas natural (metano en casi la totalidad de su porcentaje), el metanol y el amoniaco. Por otro lado, se investigarán posibles mejoras a la ignición por bujía convencional en otro paquete de estudios. Además, todo esto será inspeccionado en diferentes puntos de funcionamiento, alta (HLHS) y baja (LLLS) carga/régimen, simulando la amplitud del rango de funcionamiento de un motor de encendido provocado.

Precediendo a las simulaciones, va a ser fundamental la validación del modelo comparando sus respuestas con los datos recogidos experimentalmente. Para ello, se va a trabajar tanto con el motor físico como con su modelo numérico con gasolina como combustible y la precámara PC1 montada. Posteriormente se verán las características de este combustible (además de los otros utilizados en simulaciones) y de la precámara (a continuación en la tabla 2).

Tabla 2. Geometría de la precámara PC1.

Volumen PC (mm³)	Diámetro PC (mm)	Diámetro orificio (mm)	Nº orificios
600	8	0.7	6

Un apunte importante durante toda la campaña de ensayos es que para llevar a cabo las simulaciones en GT-POWER se necesita de datos experimentales como la liberación de calor (entre otros) conociendo, así a su vez, el comienzo de la combustión, en la cámara principal. Estos parámetros como se vio anteriormente se recogen a partir de los datos de presión en el cilindro durante el ciclo y se llevan al software para proceder a la simulación de un determinado caso. Por ello, las campañas experimentales siempre preceden a sus análogas teóricas. Es fundamental conocer la liberación de calor que se espera de una determinada simulación, ya sea con su mismo estudio realizado en el motor físico o un estudio simular con alguna adaptación de su liberación antes de introducirla en el modelo numérico.

Una vez llevados a cabo estos ensayos de validación, ya se encuentra todo listo para acometer las simulaciones necesarias para este estudio. En concreto, se van a realizar simulaciones, como se ha comentado anteriormente, no sólo con gasolina, sino que también con otros tres combustibles alternativos más como son el gas natural, el metanol y el amoniaco, cuyas características vemos a continuación en la tabla 3. En estos, se examinará la respuesta del concepto TJI ante estos combustibles con la mirada puesta en ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos. Además, se llevarán a cabo simulaciones en los dos puntos de funcionamiento diferentes, mencionados anteriormente y cuyas características vemos a continuación en la tabla 4.

Tabla 3. Características de los combustibles empleados.

	Gasolina	Metano	Metanol	Amoniaco
RON	95	120	108.7	130
Relación H/C (mol/mol)	1.761	4	4	-
Relación O/C (mol/mol)	0	0	1	-
Contenido de oxígeno (%)	0	0	50	0
A/Fest	14.374	17.16	6.43	6.05
Poder calorífico inferior-PCI (MJ/Kg)	42.793	50.02	21.10	18.59
Fórmula reducida	$C_{7.594}H_{13.376}$	CH ₄	CH ₄ O	NH ₃

Tabla 4. Características de los puntos de funcionamiento estudiados.

	Régimen (rpm)	pmi (bar)	Combustible inyectado (mg/cc)	Tª del aire de admisión (K)	Presión de admisión (bar)	Presión de escape (bar)	Tª del refrigerante y lubricante (K)	Salto de chispa (cad aTDC)
HLHS	4500	12.85	28.2	303.3	1.84	1.73	363	-8
LLLS	1350	3.85	9.6	298.7	0.538	0.999	363	-12

Estas campañas se efectuarán, además, bajo una matriz de geometrías de precámaras en las que, manteniendo constante su forma cilíndrica con un diámetro de 7,5mm y el número de orificios en 6, se variará su volumen (modificando la longitud) y el diámetro de los orificios. Con ello, se podrá observar cómo afectan estos parámetros geométricos al proceso de combustión. En la siguiente tabla (5), se reflejan los valores barridos para cada parámetro. Se llega hasta volúmenes de 1600mm³ que ya son muy elevados y comprometería su ensamblado en la culata.

Tabla 5. Matriz de simulaciones modificando el volumen de la precámara y diámetro de los orificios (DOE1).

	Valor mín.	Valor máx.	Nº niveles
Volumen PC (mm3), <i>Pre-chamber volume</i>	400	1600	7
Diámetro orificios (mm), <i>Hole diameter</i>	0.4	1.6	7

Por último, se llevará a cabo un segundo paquete de ensayos. En estos se simulará la sustitución de la bujía convencional por otro sistema avanzado de encendido de mayores prestaciones. Gracias a esto se modificarán parámetros como la duración de la combustión en la precámara (*burnduration_pc*) y el momento en el que se alcanza la mitad de la combustión en esta (*comb_tim_pc*) bajo ciertas hipótesis. Esta segunda parte tendrá como objetivo resolver los posibles inconvenientes que puedan surgir en la primera con algunos de los combustibles.

4

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS SISTEMA DE ENCENDIDO POR PRECÁMARA DE TIPO PASIVO FRENTE A DISTINTOS COMBUSTIBLES

CONTENIDO:

- 4.1. INTRODUCCIÓN
- 4.2. VALIDACIÓN DEL MODELO
- 4.3. EVALUACIÓN DE RESULTADOS
 - 4.3.1. Análisis Previo de Combustibles
 - 4.3.1.1. Velocidad de combustión laminar
 - 4.3.1.2. Emisiones. Evaluación LCA
 - 4.3.2. Configuración de Modelos
 - 4.3.3. Resultados en Alta Carga/Régimen
 - 4.3.4. Resultados en Baja Carga/Régimen
- 4.4. CONCLUSIONES

4.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo, se pretende realizar una evaluación de los resultados en una primera campaña de simulaciones en GT-SUITE. Estos primeros estudios se van a centrar en la implementación de diferentes combustibles como se ha comentado en el apartado de metodología. Estos son la propia gasolina, típicamente empleada en los MEP a lo largo de su historia, y otros combustibles alternativos como el gas natural, el metanol y el amoniaco. El objetivo en este momento está en ver el comportamiento del sistema de encendido por precámara de tipo pasivo frente a dichos combustibles.

Pero antes, primero, será importante realizar una evaluación de estos frente a la problemática de las emisiones mediante un análisis LCA, ya que posteriormente en el GT-POST, no se obtienen datos en este sentido. Además, se realizará un cálculo de sus velocidades de combustión laminares que permitirán predecir, en cierta parte, de cuáles se pueden esperar mejores prestaciones por sus características. Anterior a esto y a la campaña de simulaciones, el modelo pasará una etapa de validación como se ha comentado anteriormente en la metodología.

Una vez completadas estas fases previas, se estará en disposición de llevar a cabo las simulaciones necesarias. Se configurarán modelos mediante datos recogidos experimentalmente y alguna adaptación para cada combustible y para cada punto de funcionamiento, cuyas características hemos visto anteriormente en el punto 3.5, para hacer un barrido del amplio rango de funcionamiento de un MEP. No sólo hay que ver cómo se comporta el concepto TJI ante los distintos combustibles, sino también cómo lo hace ante cambios del punto de funcionamiento que lo pueda llevar a situaciones límites. Se operará con una mezcla cuya relación combustible-aire es menor a la estequiométrica (será de 0.83) proveniente de los ensayos experimentales y con la que se aumenta la velocidad de combustión y el rendimiento, gracias a que se puede quemar todo el combustible [12, 13, 15]. Adicionalmente, se realizarán barridos en los que se modificarán parámetros geométricos de la precámara (DOE1, mencionado en el punto 3.5) para ver la relación de estos con las prestaciones.

En el intento de analizar los resultados obtenidos de las simulaciones se va a atender siempre a dos parámetros clave que reflejan apropiadamente el rendimiento del concepto TJI y, con ello, las prestaciones del motor en general. Estos son la cantidad de momento (*Jet momentum*) que atraviesa un orificio desde la precámara a la cámara principal y el tiempo que tarda el chorro más alejado en alcanzar la pared del cilindro (*Jet penetration*) y que se denominará t^* [14].

4.2. VALIDACIÓN DEL MODELO

Como ha sido ya comentado, antes de realizar estudios en el modelo numérico es necesario comprobar la validez de este. Es fundamental confirmar que efectivamente el modelo reproduce resultados que concuerdan en un alto porcentaje con los recogidos en experimentos idénticos acometidos en el motor físico. La discrepancia entre ambos no debe superar un 5% de error. Esta primera etapa de validación, permitirá, posteriormente, llevar a cabo la campaña de simulaciones teóricas con una mayor seguridad y certeza de que los resultados obtenidos son fiables.

Por lo tanto, para esta parte se van a realizar dos tipos de ensayos. Ambos se efectuarán tanto en el motor experimental como en el numérico y se compararán sus resultados para comprobar el grado de exactitud entre ellos. Se analizará para revisar la concordancia la presión en el interior del cilindro durante el ciclo frente al ángulo del cigüeñal (*Crankangle*) por ser un parámetro revelador de lo bien o mal que está reproduciendo el comportamiento del motor físico.

En los dos ensayos se trabaja con gasolina como combustible, la PC1 montada y en un punto de funcionamiento descrito en la tabla 6 a continuación. La diferencia entre ambos reside en que mientras en el primero no se produce recirculación de los gases de escape, en el segundo sí que contamos con un 15% de EGR. Es decir, el 15% de los gases que abandonan el cilindro por las válvulas de escape al final del ciclo se reconducen a la línea de admisión. Por ello, en este segundo ensayo se adelanta el salto de la chispa para compensar el aumento de la duración de la combustión.

Tabla 6. Características generales de los puntos de funcionamiento utilizados en la etapa de validación.

Régimen (rpm)	pmi (bar)	Salto de chispa (º Ángulo de cigüeñal)	
		-5.9 sin EGR	-15.8 con EGR
3000	15.5		

Una vez se tienen resultados experimentales y teóricos, se comprueba su ajuste y si existe discrepancia entre ellos. Si estos no concuerdan, se procede a modificar parámetros del modelo uno a uno hasta que el error es prácticamente inexistente. Una vez se consigue ajustar ambas respuestas el modelo queda totalmente calibrado. A continuación, se visualiza, en la figura 4.2.1, la calibración final de ambos ensayos con un ajuste muy preciso entre los datos recogidos experimentalmente y los procedentes de las simulaciones numéricas. Además, se presenta en la tabla 7 los valores de algunos parámetros que se consideran importantes para corroborar que la calibración es total.

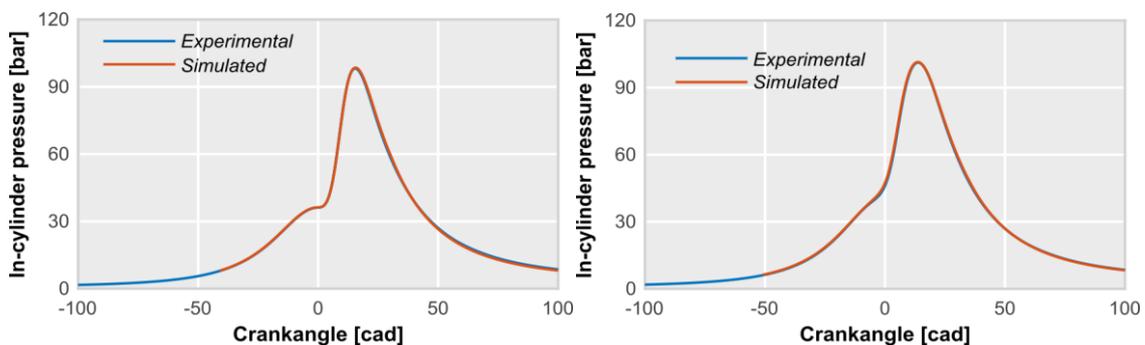


Figura [4.2.1]: Calibración del modelo en GT-POWER. A la izquierda operando sin EGR y a la derecha con un 15% de EGR.

Tabla 7. Comparación de varios parámetros importantes tras la calibración del modelo.

	<i><u>Sin EGR</u></i>		<i><u>15% EGR</u></i>	
	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.
Flujo aire (kg/h)	47.13	47.2	44.99	45.8
Masa fuel (mg/cc)	37.41	37.33	35.72	35.64
IMEP (bar)	15.51	15.2	15.44	15.7
Pmáx (bar)	98.2	98.53	101.2	101.4
Gesp (g/kwh)	198	200	189	185

4.3. EVALUACIÓN DE RESULTADOS

En este apartado se pretende dar una visión de los resultados obtenidos y se divide en dos partes. Una primera en la que se hará un análisis previo de los combustibles utilizados en las simulaciones, fijándose también en sus características en cuanto a la emisión de contaminantes, y una segunda en la que se verán los resultados propios de estas pruebas.

4.3.1. Análisis Previo de Combustibles

Primero se realizará una descripción de los combustibles con sus características frente al propio proceso de combustión (algunas de sus características que serán nombradas pueden visualizarse en la tabla 3), evaluando la velocidad de combustión laminar de estos y tras ello, se verá sus impactos medioambientales.

4.3.1.1. Velocidad de combustión laminar

Los combustibles con los que se ha decidido experimentar se ha visto que son cuatro. La gasolina ha sido el combustible típico a lo largo de la historia de los MEP y, por ello, es uno de los que se va a utilizar. Además, es importante como punto de partida para realizar comparaciones con él, conociendo de las grandes prestaciones que ha concedido a lo largo de la vida de estos motores.

Los otros tres combustibles alternativos que se han elegido son el metanol, el gas natural y el amoníaco. Como se ha visto en el capítulo 2, el proceso de combustión es fundamental realizarlo lo más rápido posible y es por ello que se va a examinar las propiedades de estos combustibles en cuanto a su velocidad de combustión laminar (Tabla 8) por su capacidad de reducir la duración del proceso. Esta velocidad laminar se calcula mediante una herramienta 1D de converge (software CFD, 3D), gracias a los mecanismos encontrados en diferente literatura [16, 17, 18] para cada combustible.

En primer lugar, el metanol [16, 19] se trata de un combustible que se puede producir a partir del gas natural, el carbón, la biomasa o incluso la basura. También, puede ser obtenido a partir de biocombustibles y se considera un combustible renovable en sí mismo. Este se ha elegido porque posee unas propiedades físico-químicas para la combustión muy interesantes, como se visualizará posteriormente con su mayor velocidad laminar con respecto a la gasolina. Además, su alto índice de octano, le permite ser más resistente a la autoinflamación y poder trabajar con relaciones de compresión más altas. Sin embargo, también tiene inconvenientes como su bajo poder calorífico o su menor volatilidad que la gasolina, que hace posible la aparición de problemas de arranque en frío. Su bajo poder calorífico es capaz de solventarlo con la menor relación aire-combustible estequiométrica que requiere, aunque esto supone un aumento de consumo. Por otro lado, se examinará con más detalle en el punto siguiente, pero, aunque es de naturaleza tóxica, su bajo contenido en carbono lleva a que se emitan menos gases de efecto invernadero en su combustión.

El siguiente combustible que se eligió fue el gas natural [12, 14, 15, 17], metano en casi la totalidad de su contenido. Este con propiedades peores a la gasolina (su velocidad laminar es menor) se escogió porque se trata de una tecnología altamente desarrollada, en comparación, por ejemplo, a las otras dos propuestas como el metanol y el amoníaco. Este no es un recurso renovable, pero comparte características con el metanol como un alto índice de octano y un menor contenido en carbono que la gasolina, que hace de él un combustible más limpio. Además posee un poder calorífico muy elevado. Sin embargo, tiene inconvenientes como el elevado volumen que ocupa y hay que tener cuidado con las fugas ya que el metano es una sustancia que participa muy activamente en el problema del calentamiento global.

El último combustible escogido fue el amoníaco [18]. Este resulta interesante por ser un combustible libre de carbono y, por lo tanto, una alternativa clara para reducir las emisiones de CO_x. También cuenta con un alto índice de octano y una baja relación aire-combustible estequiométrica. Sin embargo, su poder calorífico es bajo comparado con la gasolina y el gas natural y su velocidad laminar es la más baja de todas como se verá a continuación. Todo esto hace que su velocidad de combustión sea la más lenta de todas con la correspondiente pérdida de eficiencia y que requiera de energías de encendido elevadas para un adecuado proceso o incluso la adición de un pequeño porcentaje de hidrógeno para mejorar esta velocidad del proceso. Además, debido a su composición, su combustión produce altas emisiones de NO_x.

Tabla 8. Velocidades laminares (m/s) de cada combustible a una temperatura de 900K y a distintas presiones.

	Gasolina	Metanol	Gas Natural	Amoniaco
1 bar	3.3978	3.7370	3.2653	0.8133
30 bar	1.5107	1.8495	1.0310	0.4136
60 bar	1.2150	1.4893	0.8386	0.3285

4.3.1.2. Emisiones. Evaluación LCA

Para hablar de emisiones relativas a un tipo de combustible no sólo se debe atender al propio proceso que tiene lugar en el cilindro y a las sustancias expulsadas por el tubo de escape. Los combustibles alternativos escogidos para el presente trabajo tienen la característica de producir una combustión más limpia, en cuanto a gases de efecto invernadero como los CO_x, por tener menor contenido en carbono que la gasolina (gas natural y metanol) o directamente ser libres de carbono como el amoniaco.

Sin embargo, para realizar un estudio completo de la contaminación relativa a un tipo de energía hay que atender a todo el proceso. Además de la propia operación de combustión, es muy importante la forma de obtener el combustible, su almacenaje, transporte y la fabricación de los materiales necesarios para cada etapa. Por otro lado, no sólo se debe considerar la emisión de gases de efecto invernadero. El agotamiento de recursos fósiles, la toxicidad humana, la formación de oxidantes fotoquímicos (NO_x) o el agotamiento del agua son aspectos importantes a valorar [5, 20, 21].

En primer lugar, atendiendo a la emisión de CO₂, se puede considerar que el gas natural tiene el menor impacto a lo largo de todo el proceso debido a que se trata de un recurso natural. La obtención de metanol y amoniaco se lleva a cabo a partir del propio gas natural en un proceso de reformado con vapor de metano. Por lo tanto, es por ello, que aunque en la propia operación del motor la combustión sea más limpia con ellos, obtengan unas cotas más altas en todo el proceso debido a las fases previas. Además, anteriormente se ha visto como el poder calorífico de combustibles como el metanol o el amoniaco es significativamente menor, lo que lleva a la necesidad de un mayor consumo de estos para obtener la misma potencia. Sin embargo, también se puede considerar la obtención del amoniaco a partir de recursos renovables en un proceso de electrólisis del agua con la energía eólica como fuente de electricidad. En este caso, la emisión de CO₂ a lo largo del proceso de este combustible sería muy baja respecto a los otros tres. El amoniaco pasa, en este punto, de ser la peor alternativa de las cuatro cuando se genera a partir de gas natural a la mejor cuando se genera a partir de recursos renovables.

En cuanto al agotamiento de recursos fósiles, ocurre exactamente lo mismo con el menor impacto utilizando gas natural excepto cuando se compara al amoniaco proveniente de recursos renovables. En tercer lugar, correspondiente a la toxicidad humana, el amoniaco tiene un impacto muy grande siendo el mayor cuando proviene de recursos renovables y el segundo mayor cuando proviene del gas natural, sólo superado por el metanol.

Atendiendo al agotamiento del agua, es otra vez el amoniaco, ya sea proveniente de recursos renovables, con el mayor impacto, o de gas natural con un impacto un poco menor, los que suponen las cotas más altas. El resto de combustibles, tienen un impacto muy bajo comparado con él. Y por último, correspondiente a la formación de oxidantes fotoquímicos, se vuelve a ver al amoniaco con el mayor impacto, especialmente cuando se obtiene a partir de gas natural. El resto de combustibles, incluido el amoniaco proveniente de recursos renovables, tienen impactos menores, siendo el metanol el de menor impacto.

4.3.2. Configuración de Modelos

En este momento, se está preparado para llevar a cabo las simulaciones y el siguiente paso es configurar los modelos para cada combustible y para cada punto de funcionamiento. Como ha sido mencionado en la metodología y en la introducción del presente capítulo, para esta configuración se necesita de datos experimentales recogidos de operar con el motor real.

Experimentalmente la instalación disponible no ofrece la posibilidad de operar con los cuatro combustibles que son objeto del presente estudio. Por ello, se ha trabajado con gasolina en los dos puntos de funcionamiento y para los tres combustibles restantes se harán adaptaciones que se van a comentar a lo largo de este punto.

De los datos recogidos del motor físico, se procede a llevar a los modelos, dependiendo del punto de funcionamiento, los siguientes:

- La liberación de calor (HRR) en la cámara principal. De esta también se obtiene el comienzo de la combustión en la cámara principal (SoC_MC) cuando dicho valor alcanza 1 (J/cad) aproximadamente, siempre que este sea posterior al cumplimiento de un porcentaje suficiente de la combustión en la precámara. En la figura 4.3.2.1, a continuación, se muestran las liberaciones de calor obtenidas experimentalmente de trabajar con gasolina en los dos puntos de funcionamiento frente al ángulo del cigüeñal. Se observa como esta liberación de calor es mayor y más amplia cuando aumenta la carga y el régimen.
- La presión y temperatura de entrada de la mezcla. Estas se recogen las registradas en el interior del cilindro en el ángulo -42 del cigüeñal que es el instante en el que comienza el ciclo cerrado (se cierran las válvulas de admisión).

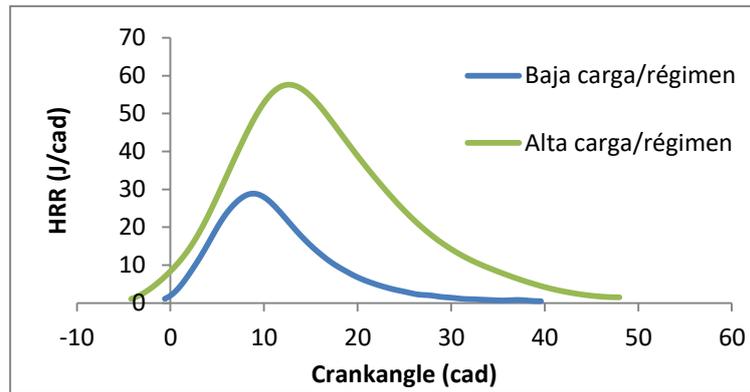


Figura [4.3.2.1]: Liberación de calor experimental operando con gasolina y la PC1 montada en cada punto de funcionamiento.

A su vez, también habrá que configurar los datos propios del punto de funcionamiento como el régimen de giro y el salto de la chispa (*Spark_tim*). Este último será importante en el cálculo del momento en el que se alcanza la mitad de la combustión de la precámara (*comb_tim_pc*) por la siguiente fórmula:

$$comb_tim_pc = Spark_tim + (burnduration_pc/2), \quad (4.3.2.1)$$

Burnduration_pc, de la anterior fórmula como la duración de la combustión en la precámara y mencionado en puntos anteriores, es dependiente del combustible empleado y de la geometría de esta propia. En el caso de las simulaciones llevadas a cabo en este capítulo, se mantendrá este parámetro fijo del obtenido al utilizar la PC1, cuyas especificaciones se vieron en la tabla 2. Tampoco se modificará al operar en distinto punto de funcionamiento.

Una vez obtenido este valor, se programará la matriz de casos DOE1 definida en el punto 3.5, ya mencionada, modificando la geometría de la precámara en cuanto a volumen y diámetro de los orificios. Su forma cilíndrica, junto con un diámetro de 7,5 mm, y un número de orificios de 6 se mantendrán fijos. Sin embargo, esta matriz será recorrida sin alterar el valor de la duración de la combustión en la precámara para ver cómo afectan estos parámetros geométricos al proceso.

Por otro lado, finalmente, a todo lo anterior referido a un modelo de gasolina (mismo combustible que el empleado experimentalmente) hay que añadirle dos adaptaciones para operar con los combustibles alternativos que se ven a continuación.

- En primer lugar, hay que modificarle la presión de entrada multiplicando por el siguiente coeficiente:

$$\frac{PCI\ gasolina / (A/F_{est})gasolina}{PCI\ comb.\ alt / (A/F_{est})comb.\ alt}$$

Esto es importante para mantener la energía aportada por el combustible. Además se modificarán los porcentajes de aire-fuel introducidos por los propios de una reacción con dicho combustible manteniendo el dosado.

- En segundo lugar, conociendo las velocidades laminares de los combustibles, se adapta burnduration_pc a una más adecuada para cada uno de ellos mediante una relación de las primeras:

$$\frac{Vel_lam_gasolina}{Vel_lam_comb.\ alt}$$

4.3.3. Resultados en Alta Carga/Régimen

En primer lugar, se analiza un punto de funcionamiento con un régimen de giro elevado y una alta carga introducida (HLHS, tabla 4). Este es interesante por tratarse de un punto en el que, debido al poco tiempo que hay para realizar la combustión por la rapidez de giro, el llenado y vaciado de la precámara puede verse comprometido. Ya fue comentado que este aspecto era clave y lo es más aún en el sistema de tipo pasivo donde no se puede controlar el dosado dentro de la precámara de forma directa.

Además se trata de un punto que puede verse afectado por la detonación. Las velocidades de combustión más altas gracias al sistema TJI, en principio, debe mitigar este efecto, pero la alta relación de compresión empleada puede ayudarlo a aparecer.

A partir de este momento, se van a presentar los resultados obtenidos para cada uno de los combustibles implantados. Como se adelantó en la introducción, con el objetivo de analizar el rendimiento del concepto TJI con cada combustible, se va a atender a dos parámetros claves como son la cantidad de momento y el tiempo que tarda el chorro más alejado en alcanzar la pared del cilindro (t^*). Unos valores óptimos de estos parámetros garantizan una combustión eficiente.

- **Gasolina**

Se parte de la gasolina, sabiendo de su alto rendimiento ofrecido a los MEP a lo largo de su historia. Por lo tanto, esperando valores altos en cuanto a estos parámetros de este combustible gracias a una adecuada velocidad laminar como se vio anteriormente, nos servirá como punto de comparación para los demás combustibles.

En primer lugar, se va a hacer un análisis del primer parámetro para ver de dónde viene y el por qué de su importancia que sirva para entender posteriormente todos los resultados de cada combustible. La cantidad de momento que atraviesa un orificio se mide en N y queda definida por la siguiente expresión:

$$M = m * v, \quad (4.3.3.1)$$

Donde m es el gasto másico en kg/s que atraviesa el orificio y queda definido en la siguiente expresión (4.3.3.2) y v es la velocidad de este en m/s.

$$m = A * \rho * v, \quad (4.3.3.2)$$

Donde A es el área efectiva del orificio en m^2 , ρ es la densidad de la mezcla en kg/m^3 y v otra vez la velocidad de esta en m/s (finalmente el momento depende del cuadrado de la velocidad de la mezcla al atravesar el fluido).

Por ello, en primer lugar, operando con gasolina, se va a visualizar en la siguiente figura (4.3.3.1) el gasto másico (*Mass flow rate*) y la velocidad que atraviesa un orificio (*Jet velocity*) en función de la geometría de la precámara (DOE1) para ver como efectivamente estos dos parámetros son los que afectan a la cantidad de momento.

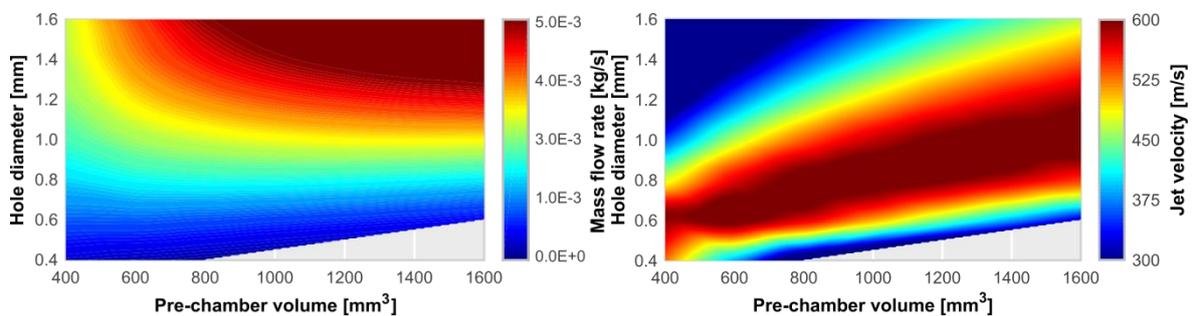


Figura [4.3.3.1]: Mapas de gasto másico a la izquierda y velocidad del chorro a la derecha frente al volumen de la precámara y el diámetro de los orificios para la gasolina a alta carga/régimen.

Se visualiza en la figura anterior como el gasto másico aumenta en gran medida con el crecimiento del diámetro de los orificios, ya que la mezcla tiene menos impedimento para atravesarlos. Por otro lado, en menor medida aumenta al extender el volumen de la precámara cuando a volúmenes pequeños la cantidad de la mezcla que se dispone a entrar en la precámara no tiene lugar en ella por estar ya llena. En el caso de la velocidad del chorro se consigue un máximo de esta para cada volumen a cierto diámetro de orificio que permite la entrada de una cantidad de mezcla adecuada y este diámetro es lo suficientemente pequeño para contabilizar una diferencia de presión, entre las dos cámaras, alta. Con todo ello, en la siguiente figura 4.3.3.2 se muestran los mapas para la máxima cantidad de momento y para la capacidad de penetración del chorro.

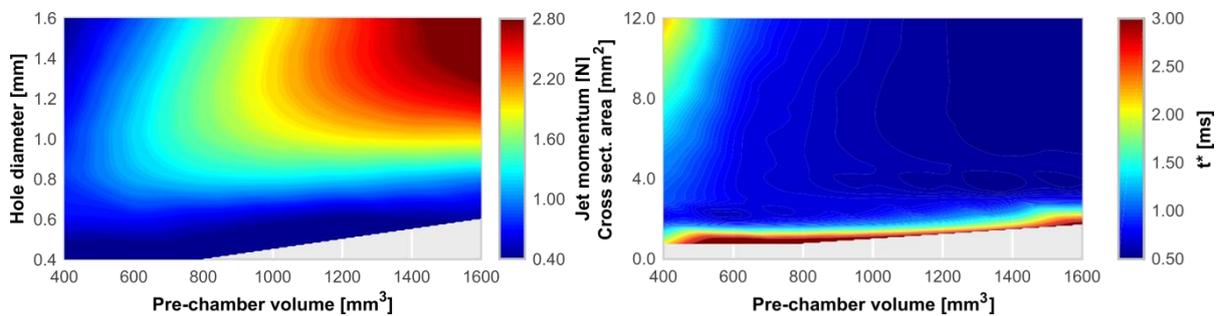


Figura [4.3.3.2]: Mapas de máxima cantidad de momento a la izquierda y t^* a la derecha frente al volumen de la precámara y el diámetro de los orificios para la gasolina a alta carga/régimen.

Por lo tanto, en el mapa de cantidad de momento se puede observar como este parámetro aumenta a medida que aumenta el volumen de la precámara con espacio para una mayor cantidad de mezcla y, por lo tanto, combustible. Dentro de cada volumen, para optimizar el momento, se requiere de un diámetro de orificios específico que por un lado sea suficientemente grande para permitir la entrada de mezcla de la cámara principal a la precámara, pero sin ser excesivo para ayudar la presurización de esta. En el margen derecho inferior, del mismo modo que ocurría en los mapas de gasto másico y velocidad, se visualizan casos sin valores en los que no hay eyección debido a que se tratan de geometrías de precámaras con volúmenes elevados que requieren de gran cantidad de masa al inicio de la combustión para presurizarla pero los bajos diámetros de orificios de estas dificultan la entrada de la mezcla.

En cuanto a t^* , el mapa se muestra frente a la sección de los orificios (*Cross sect. area*) directamente proporcional al diámetro de estos. Se puede observar como este barrido es exitoso con tiempos muy bajos en casi la totalidad del mapa. Las altas cantidades de momentos obtenidas en la mayoría de las geometrías ayudan a que este proceso sea rápido gracias a la velocidad con la que salen los chorros. Los mayores problemas se encuentran con diámetros muy pequeños. Operando con gasolina a alta carga/régimen, visualizando ambos mapas, se obtienen geometrías de precámaras óptimas en el máximo de los volúmenes y con un diámetro de orificios de 1.4mm cercano al máximo, ya que no perjudica la presurización de esta.

- **Gas Natural**

En cuanto al gas natural se ha visto como sus propiedades físico-químicas con una velocidad laminar menor eran inferiores a la de la gasolina. Se recuerda que la energía aportada por el combustible se mantiene entre ellos modificando la presión en la admisión y la fracción másica, sin embargo, con una duración de la combustión en la precámara mayor se espera que disminuyan sus prestaciones. En la siguiente figura 4.3.3.3, se muestran los mapas para la cantidad de momento y t^* para cada caso del DOE1.

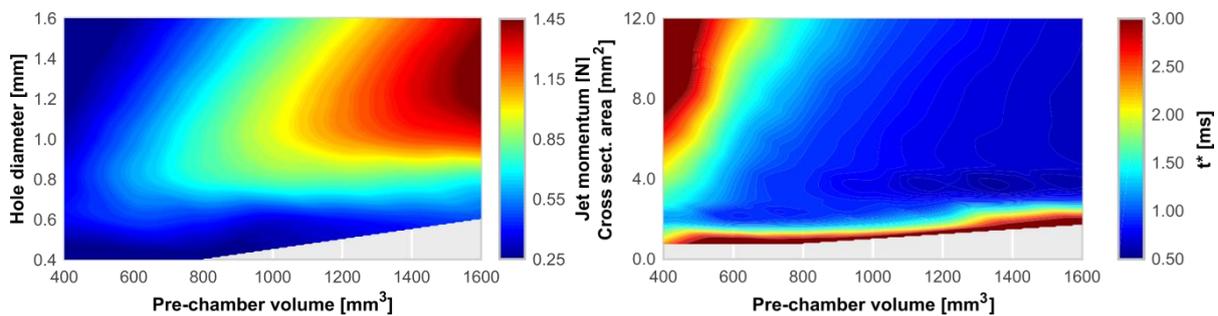


Figura [4.3.3.3]: Mapas de máxima cantidad de momento a la izquierda y t^* a la derecha frente al volumen de la precámara y el diámetro de los orificios para el gas natural a alta carga/régimen.

Por un lado, se visualiza un mapa de momentos con una distribución similar que el de gasolina (será la tónica habitual para este tipo de mapas). Sin embargo, como fue comentado y se esperaba, su escala de momentos es menor con una disminución de aproximadamente el doble frente a la gasolina. Al igual que en la gasolina, también existen los mismos casos de geometría en los que no se produce eyección por las mismas circunstancias.

Fijándose en el mapa de penetraciones se observa un mapa con tiempos de penetración más altos también. Además, operando con gas natural, las geometrías de la esquina superior izquierda, correspondiente a los volúmenes más pequeños y los diámetros más altos, cuentan con muchos problemas de penetración. Estos altos diámetros que dificultan la aparición de una gran diferencia de presión entre la precámara y la cámara principal, en volúmenes que de por sí no permiten una gran cantidad de mezcla en la primera, no ayudan al proceso. Operando con este combustible, las geometrías óptimas siguen en los volúmenes más altos, pero esta vez disminuyendo el diámetro de orificios a 1.2mm y nunca llegando a barrer la cámara principal en tiempos menores a 0.5ms.

- **Metanol**

Al contrario que ocurre con el gas natural, en este caso las propiedades físico-químicas del metanol para la combustión son excelentes. Su velocidad laminar, como se ha visto, incluso supera la de la gasolina y es por ello, que se espera que el concepto de encendido por precámara de tipo pasivo de una gran respuesta ante este con una duración de la combustión en esta menor. En la siguiente figura 4.3.3.4, se vuelven a presentar los valores obtenidos de momento y t^* para los casos del DOE1 en el caso del metanol.

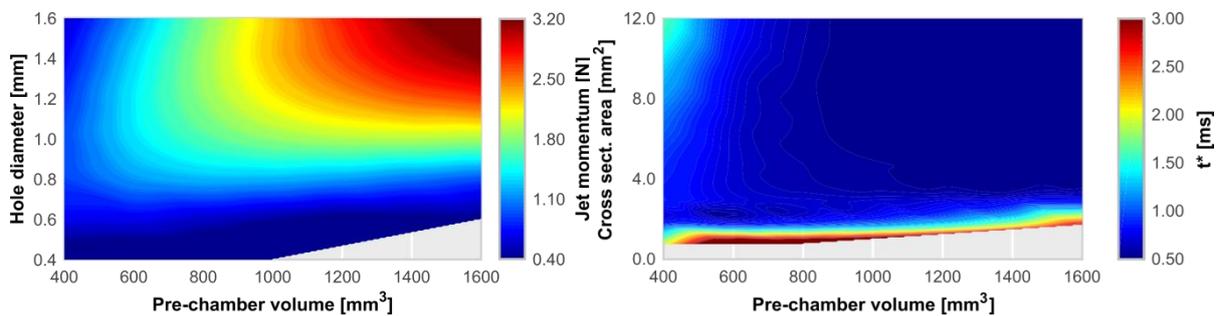


Figura [4.3.3.4]: Mapas de máxima cantidad de momento a la izquierda y t^* a la derecha frente al volumen de la precámara y el diámetro de los orificios para el metanol a alta carga/régimen.

Los valores de cantidad de momento obtenidos por el metanol superan, en pequeña medida, a los de la gasolina como se preveía y se puede ver en la escala. Además, el número de geometrías sin eyección (con volúmenes grandes y el menor diámetro de 0.4mm) disminuyen. Como consecuencia a estos mayores momentos, la penetración de los chorros también se vuelve aún más rápida. En este sentido se comprueba como en gran parte del mapa para casos de volúmenes y diámetros de orificios altos, el tiempo requerido para penetrar completamente la cámara principal y alcanzar la pared del cilindro es menor a 0.5ms. En el caso del metanol, la geometría que optimiza estos parámetros y, por tanto la operación del concepto, es aquella con el volumen y el diámetro más grande.

- **Amoniaco**

Finalmente, con las peores propiedades ante el proceso de combustión se encuentra el amoniaco. Fijándose en su velocidad laminar frente a la de la gasolina se espera que aumente la duración de la combustión en la precámara en un orden de magnitud de entorno al triple de la de referencia vista para dicho combustible. Es por ello, que las prestaciones del concepto con amoniaco se deben ver muy perjudicadas en principio.

En este caso tras observar el GT_POST tras la simulación, se observaron comportamientos totalmente diferentes a los obtenidos con los anteriores combustibles. Una duración tan larga de la combustión en la precámara no permite una buena presurización de esta y el resultado de ello es que no se observa eyección desde la precámara a la cámara principal. Por ello, a continuación en la figura 4.3.3.5 se opta por mostrar el perfil de la cantidad de momento, en función del ángulo de cigüeñal, tanto para amoniaco como gasolina para una geometría de precámara óptima para la segunda y así, poder visualizar las diferencias entre ellos.

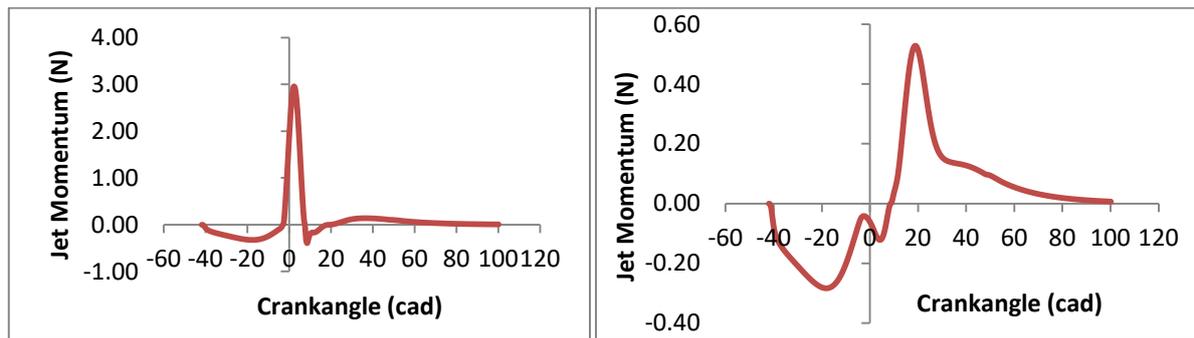


Figura [4.3.3.5]: Perfiles de la cantidad de momento para gasolina a la izquierda y amoniaco a la derecha a alta carga/régimen para una geometría de precámara de 1600mm^3 y 1.4mm de diámetro de orificios.

Se visualiza en la figura como hay diferencias muy grandes entre ambos perfiles de momento y efectivamente no existe la eyección en el caso del amoniaco. En los dos casos mientras se produce la compresión los momentos se encuentran en un valor negativo, ya que se está produciendo el llenado de la precámara y la mezcla está atravesando los orificios pero en el sentido contrario.

Para la gasolina una vez se produce el llenado y ha saltado la chispa produciéndose la combustión en la precámara llega un momento en el que debido a la diferencia de presión (más alta en la precámara) comienza la eyección. Ahora los chorros con gran velocidad atraviesan los orificios, pero en sentido positivo desde la precámara a la cámara principal produciéndose un máximo de cantidad de momento en un ángulo cercano al PMS. Tras este pico, la cantidad de momento va disminuyendo a medida que la eyección va finalizando y se estabiliza en 0N.

Sin embargo, operando con amoniaco se observa como la etapa de llenado no acaba hasta pasado el PMS. Se percibe un pico de momento, cerca de este punto, pero nunca se llega a hacer positivo antes de volver a disminuir. Es decir, tras el salto de la chispa en -8cad y el comienzo de la combustión en la precámara la presurización de esta es inexistente y sigue entrando mezcla hacia ella. Finalmente sí que se vacía la precámara alcanzándose un pico de momentos positivos, ya que el pistón obliga a la mezcla a salir de la precámara, pero de valor muy bajo que ya no corresponden a un proceso de eyección de chorros reactivos capaces de iniciar la combustión en la cámara principal.

4.3.4. Resultados en Baja Carga/Régimen

En este punto se analiza un punto de funcionamiento totalmente opuesto en el que los motores también trabajan frecuentemente (por ejemplo, al arrancar y en muchas situaciones en ciudad) y, por lo tanto, es fundamental analizar. Al trabajar a baja carga/régimen (LLLS, tabla 4) el problema puede estar en si dentro de la precámara se reúnen las condiciones necesarias para el encendido en cuanto a cantidad de mezcla para una determinada geometría de esta. A continuación, se evalúan los resultados obtenidos para cada combustible.

- **Gasolina**

Como en el punto de alta carga/régimen se comienza con gasolina como combustible para establecer un punto de partida. A baja carga/régimen se espera una disminución de las prestaciones de la precámara de tipo pasivo debido a una disminución de la cantidad de mezcla introducida al cilindro y, por tanto, también a dicha precámara. A continuación, en la figura 4.3.4.1 se visualizan los mapas de máxima cantidad de momento y t^* resultado de operar en estas condiciones.

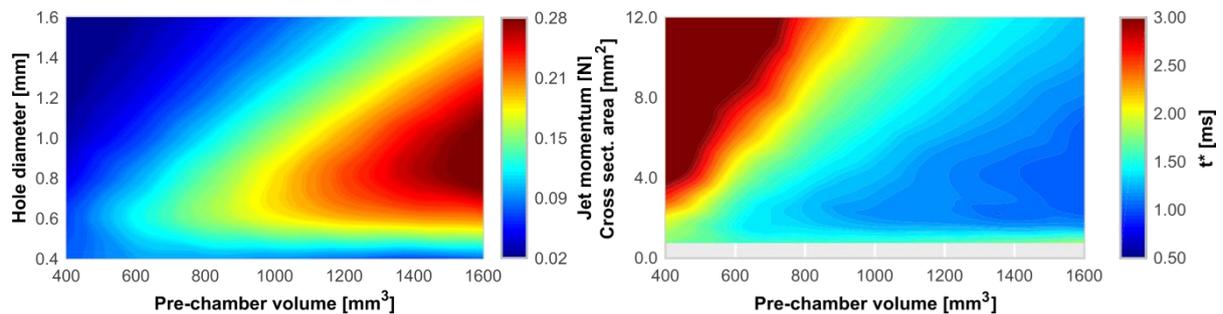


Figura [4.3.4.1]: Mapas de máxima cantidad de momento a la izquierda y t^* a la derecha frente al volumen de la precámara y el diámetro de los orificios para la gasolina a baja carga/régimen.

Por un lado, ambos mapas siguen una tendencia similar a los análogos a alta carga/régimen. Volúmenes mayores mejoran ambos parámetros por el aumento de cantidad de mezcla en la precámara al inicio de la combustión. Y para cada volumen se encuentra un óptimo de diámetro de orificios que permita la entrada de la mezcla sin dificultad y sea suficientemente pequeño para presurizar este pequeño volumen, al igual que ocurría a alta carga/régimen.

Sin embargo, como se preveía los valores de cantidad de momento y tiempo de penetración empeoran mucho. Los primeros son del orden de 10 veces menos y los segundos se doblan. Además, se observa como las geometrías óptimas han disminuido su diámetro de orificios. Esto ocurre ya que la entrada de cuanta más mezcla posible no es un impedimento al entrar menor cantidad al cilindro. Dentro del rango de diámetros que permiten entrar una adecuada cantidad de esta será el de menor diámetro el que consiga una mayor presurización y, por tanto, mejorar las prestaciones. Operando a baja carga/régimen con gasolina se encuentra el óptimo en una geometría de 1600mm^3 y 0.8mm consiguiendo tiempos de barrido de la cámara principal cercanos a 1ms .

- **Gas natural**

Ahora se observan los mapas (figura 4.3.4.2) correspondientes a trabajar con gas natural que, como se demostró anteriormente, se trata de un combustible con peores propiedades en cuanto a la combustión.

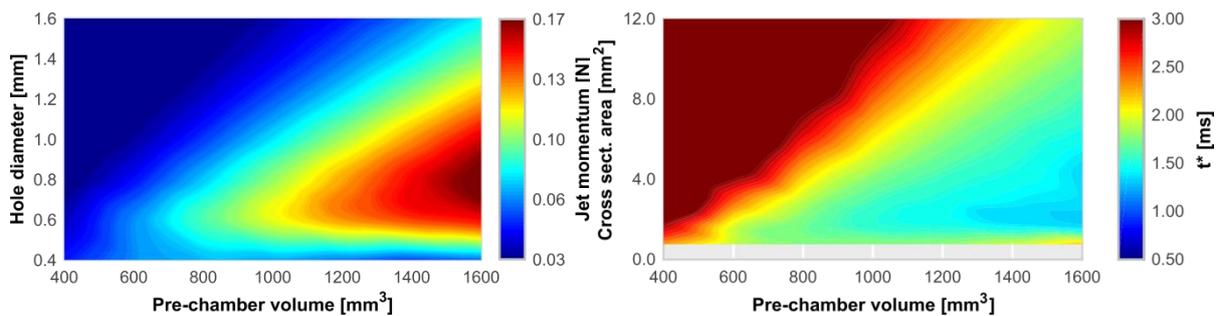


Figura [4.3.4.2]: Mapas de máxima cantidad de momento a la izquierda y t^* a la derecha frente al volumen de la precámara y el diámetro de los orificios para el gas natural a baja carga/régimen.

En cuanto a la cantidad de momento se visualiza un mapa de tendencia similar al de gasolina, pero como se esperaba, con una escala de valores menor. En el mapa de penetración de los chorros, la esquina inferior derecha (zona con mejores prestaciones) se aclara con tiempos de penetración mayores. Por el otro lado, se extiende la zona roja con tiempos superiores a 3ms , correspondiente a volúmenes bajos y diámetros de orificios grandes, en los que estos y la poca cantidad de mezcla en la precámara al inicio de la combustión perjudican la presurización de esta. Las zonas óptimas siguen bajando y operando con gas natural a baja carga/régimen se encuentra en una geometría de 1600mm^3 y 0.6mm (segundo diámetro más pequeño) con tiempos muy poco por debajo de 1.5ms .

- **Metanol**

El metanol, cuyas propiedades físico-químicas se ha visto que son excelentes, se pretende a continuación examinar si también mejora las prestaciones de la gasolina ante el concepto TJI en este punto de funcionamiento. La figura 4.3.4.3 muestra estos resultados.

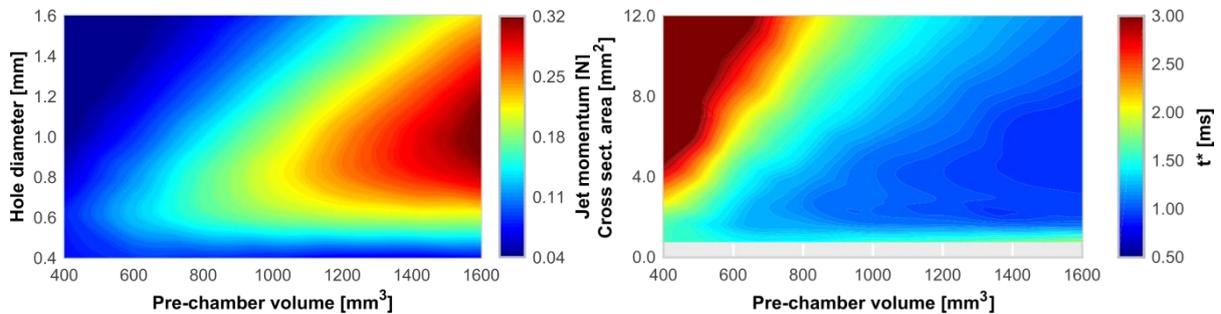


Figura [4.3.4.3]: Mapas de máxima cantidad de momento a la izquierda y t^* a la derecha frente al volumen de la precámara y el diámetro de los orificios para el metanol a baja carga/régimen.

Se observa, otra vez, que el metanol se sigue manteniendo como el combustible que obtiene las mejores prestaciones del concepto. Desplaza los mapas hacia arriba frente a los anteriores de gasolina y gas natural, encontrándose la geometría óptima en 1600mm^3 y 1.2mm de diámetro de orificios bajando el tiempo de penetración de 1ms . Se observa en este caso de t^* , un mapa muy azul en la mayoría de casos con barridos de la cámara principal adecuados. En comparación con la simulación con metanol a alta carga/régimen se siguen manteniendo las diferencias empeorando las prestaciones. A continuación, en la figura 4.3.4.4 se va a visualizar las diferencias entre las penetraciones de los casos en cada punto de funcionamiento.

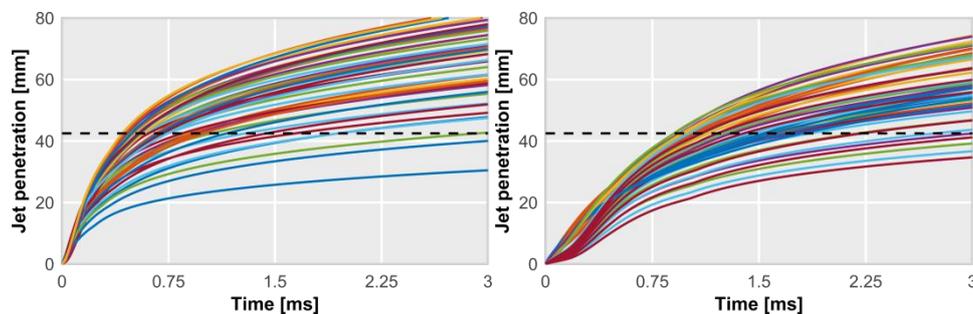


Figura [4.3.4.4]: Figuras de penetración de los casos a alta carga/régimen a la izquierda y baja carga/régimen a la derecha para el metanol.

En la anterior figura la línea negra discontinua representa la pared del cilindro y se observa como el alcance del chorro más alejado de esta para la globalidad de casos se desplaza hacia la derecha (tiempos mayores) en el punto de funcionamiento de baja carga/régimen. Mientras a alta carga/régimen gran parte de los casos la alcanzan en tiempos menores a 0.75ms, a baja carga/régimen no hay ni un solo caso que lo consiga antes de ese tiempo. Además, se observa que hay más casos a baja carga/régimen en los que el chorro no alcanza la pared del cilindro ni tras 3ms. Estos se tratan de los correspondientes a volúmenes pequeños y diámetros de orificios elevados, mientras que a alta carga/régimen son los referentes a volúmenes elevados y diámetros pequeños.

- **Amoniaco**

Al igual que ocurría a alta carga/régimen, con un motivo mayor por la menor cantidad de mezcla disponible en este punto, se espera observar comportamientos negativos con amoniaco debido a su peores propiedades. Por ello, se vuelve a proceder a mostrar en la figura 4.3.4.5 los perfiles de cantidad de momento con una geometría óptima de la gasolina en este punto y así examinar las diferencias entre ambos.

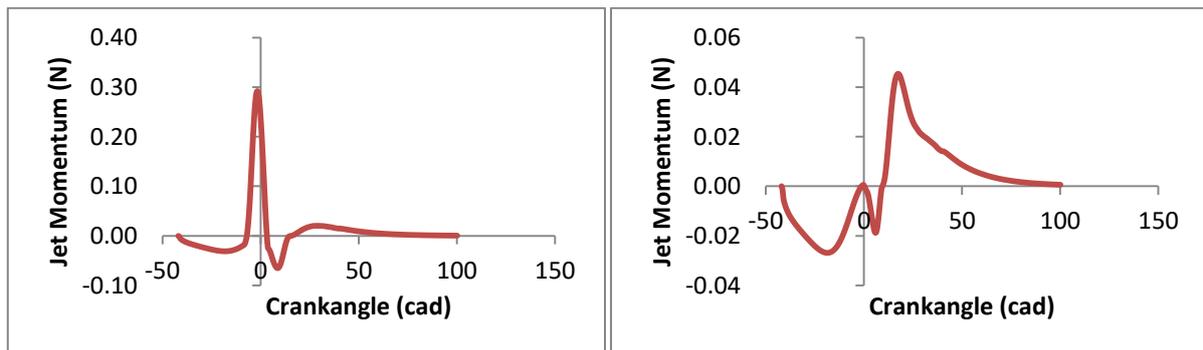


Figura [4.3.4.5]: Perfiles de la cantidad de momento para gasolina a la izquierda y amoniaco a la derecha a baja carga/régimen para una geometría de precámara de 1600mm^3 y 0.8mm de diámetro de orificios.

Observando la figura anterior, se comprueba que efectivamente ocurre lo mismo a baja carga/régimen y operando con amoniaco no se consigue eyectar desde la precámara hacia la cámara principal. En una escala de valores menor, como era lógico, se visualiza el mismo comportamiento en los perfiles que el mencionado en el punto anterior. El primer pico a baja carga/régimen por muy poco tampoco llega a hacerse positivo nunca y, por tanto, el amoniaco sigue siendo una alternativa deficiente ante este concepto.

4.4. CONCLUSIONES

Tras las simulaciones llevadas a cabo se puede extraer varias conclusiones que se van a ir exponiendo en el presente punto. En primer lugar se demostró como el modelo empleado es capaz de reproducir la operación del motor físico obteniendo unos resultados totalmente acordes a los experimentales. Se realizaron simulaciones con ambos métodos y tras un proceso de calibración se consiguieron unos resultados muy ajustados, concluyendo en la validación del modelo.

En cuanto a los diferentes combustibles empleados, se examinó la velocidad laminar de ellos como un parámetro fundamental para evaluar sus propiedades frente al proceso de combustión. El metanol se destacó como un combustible con unas mejores cualidades a la gasolina a diferencia del gas natural y el amoniaco, cuyas velocidades laminares son significativamente menores.

Y efectivamente este parámetro fue totalmente determinante en la operación del concepto de encendido por precámara de tipo pasivo. La menor duración de la combustión en la precámara por parte del metanol le hizo que dicho concepto obtuviera las mejores prestaciones con este, mejorando con una pequeña diferencia las logradas con gasolina. Las menores velocidades laminares del gas natural y, sobretodo, del amoniaco causaron que la respuesta del concepto ante ellos no fuera tan buena, incluso llegando a no producirse el proceso de eyección con el último.

Por otro lado, la situación frente a la contaminación de estos combustibles se evaluó anterior a las simulaciones y en un proceso completo de vida, no sólo poniendo el foco en la operación del propio motor. En ella se observó, como combustibles más limpios en la operación como el amoniaco y el metanol obtienen, sin embargo, las mayores cotas de generación de CO₂, motivado por sus procesos mayoritarios de producción a partir de gas natural. Además, estos se tratan de combustibles de naturaleza tóxica y el amoniaco es el más influyente en la formación de otras sustancias contaminantes como son los NOx. Otro inconveniente de estos dos últimos está en su menor PCI que compensan con una relación aire-fuel estequiométrica menor, pero que les lleva a necesitar más combustible para poder mantener la energía.

Sin embargo, observado con el amoniaco cuando se obtiene a partir de recursos renovables, la formación de estos combustibles a partir de otros recursos, no tan generalizados por su mayor dificultad, podría reducir considerablemente su impacto frente a la emisión de gases contaminantes. En el caso del metanol, se podría considerar su producción a partir incluso de basura, lo que podría llevarle a incluso ser más limpio que el gas natural, cuyos impactos eran los menores gracias a que es una sustancia natural disponible en la naturaleza.

Por todo ello, finalmente se puede concluir que estos combustibles alternativos tienen inconvenientes tanto en su producción por la emisión de sustancias contaminantes (metanol y amoniaco) como en la operación por su bajas propiedades para el proceso de combustión (gas natural y amoniaco). Pero el primer problema se puede salvar como se ha comentado anteriormente y el segundo es objeto del siguiente capítulo. Es posible recuperar prestaciones de estos combustibles, peores a priori, mediante sistemas de ignición que mejoren la bujía convencional y proporcionen más energía a la mezcla. Esto llevaría a menores duraciones de la combustión mejorando el concepto TJI con ellos.

5

CAPÍTULO 5: ELEVACIÓN DE PRESTACIONES MEDIANTE SISTEMAS AVANZADOS DE ENCENDIDO DE ALTA ENERGÍA

CONTENIDO:

- 5.1. INTRODUCCIÓN
- 5.2. EVALUACIÓN DE RESULTADOS
 - 5.2.1. Recuperación de Prestaciones con los Combustibles Lentos
 - 5.2.1.1. Resultados en alta carga/régimen
 - 5.2.1.2. Resultados en baja carga/régimen
 - 5.2.2. Relevancia de los Parámetros Relativos al Proceso de Combustión en la Precámara
- 5.3. CONCLUSIONES

5.1. INTRODUCCIÓN

Una vez se ha analizado el comportamiento del motor con un encendido por precámara de tipo pasivo frente a diferentes combustibles y se han sacado conclusiones de ello, en este capítulo se pretende dar un paso más para intentar mejorar las prestaciones del sistema frente a alguno de estos.

Se observó anteriormente como con gas natural y amoniaco con velocidades de combustión laminares menores a la de la gasolina (utilizada de referencia), el concepto TJI obtenía menores valores de cantidad de momento y mayores tiempos de barrido de la cámara principal empeorando su comportamiento. En el caso del amoniaco incluso se vio como la precámara no conseguía eyectar chorros reactivos a la cámara principal para poder encender la mezcla en esta última.

Sin embargo, esta actuación frente a estos combustibles se considera corregible. En el capítulo 2, se mencionó y explicó la existencia de sistemas avanzados de encendido, los cuales son capaces de entregar un aporte de energía mayor. Uno de ellos fue este concepto de encendido por precámara o TJI en el que se ha centrado el presente proyecto, pero que no es incompatible con los restantes. Estos últimos se centran en una sustitución de la bujía convencional por otro sistema y, por tanto, son sistemas que se pueden incorporar al propio concepto TJI acelerando aún más el proceso de combustión. Se conseguiría mayor rapidez en el proceso que ocurre en el interior de la precámara.

En este sentido el presente capítulo tiene como objetivo la posibilidad de seguir apostando por combustibles más lentos como el gas natural y el amoniaco. Se analizó en el capítulo anterior también, que estos se trataban de combustibles con características en ciertos aspectos muy importantes para reducir la contaminación. Y es por ello que resulta interesante trabajar en poder asemejar la operación del motor con estos a las obtenidas con combustibles con mejores propiedades como se vio del metanol y la gasolina y así solucionar los problemas energéticos de estos, ayudándose de tecnologías complementarias, y aprovechar sus propiedades beneficiosas en otras cuestiones comentadas.

Por todo ello, en esta campaña de estudios se van a llevar a cabo simulaciones en las que se modifiquen los parámetros relativos a la combustión en la precámara (`burnduration_pc` y `comb_tim_pc`) para estos combustibles. Esto se realizará gracias a la hipótesis mencionada anteriormente de trabajar con un sistema avanzado de encendido que sustituye a la bujía convencional empleada en la campaña de simulaciones del capítulo anterior.

Las simulaciones se llevarán a cabo para las dos condiciones de punto de funcionamiento, alta y baja carga/régimen, y bajo diferentes combinaciones de geometrías de precámara que conforma la matriz DOE1, ambas situaciones empleadas ya en el capítulo anterior.

En segundo lugar, se configurará una simulación en gasolina a baja carga/régimen que ayude a entender los resultados obtenidos en el presente capítulo. En esta, al igual que habitualmente, se analizarán la cantidad de momento y t^* obtenidos, pero dependiendo de casos construidos a partir de combinaciones de los parámetros relativos a la combustión en la precámara. La geometría de la precámara esta vez se mantendrá fija.

5.2. EVALUACIÓN DE RESULTADOS

En este punto se van a evaluar los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones. Primero se pondrá el foco en el impacto que produce la implantación de sistemas avanzados de encendido de alta energía. Como se ha comentado se analizarán los dos combustibles más lentos, gas natural y amoniaco, en la que la recuperación de prestaciones era totalmente necesaria para seguir considerándolos opciones.

En segundo lugar, se pretenderá analizar con más detalle por qué se obtienen estas mejoras en el comportamiento del sistema de encendido por precámara con esta variación en la ignición.

5.2.1. Recuperación de Prestaciones con los Combustibles Lentos

Como quedó explicado en el capítulo 2, se conocen sistemas avanzados de encendido que son capaces de aportar una mayor cantidad de energía a la mezcla. Estos, en comparación con la bujía convencional, favorecen y mejoran el encendido de esta y la propagación de la llama. Entre ellos se vio que destacaban sistemas como encendidos por descarga capacitiva, carga múltiple de alta frecuencia, corona de radio-frecuencia, plasma por microondas o láser.

La diferente actuación del motor gracias a la implantación de alguna de las tecnologías anteriores se va a controlar con el parámetro `burnduration_pc` que a su vez modificará secundariamente `comb_tim_pc` por la ecuación 4.3.2.1. Esta tecnología como se ha comentado va a permitir la mejora de la combustión en la precámara mediante aumentos del volumen de encendido, el tamaño del plasma o incluso generar múltiples puntos de ignición, también en la precámara, con el encendido por láser. Por tanto todo ello, nos va a mejorar esta combustión que se traduce en mayores velocidades de ella y menores tiempos monitorizado directamente por los parámetros mencionados.

Así, en esta campaña se va a asumir una hipótesis en la que se igualará la duración de la combustión en la precámara producto de utilizar gasolina con la bujía convencional a la que se obtendría utilizando gas natural y amoniaco con uno de los nuevos sistemas avanzados de encendido. Se considera que esta nueva tecnología será capaz de compensar el déficit energético de estos combustibles y que, por tanto, esta hipótesis es razonable, gracias a la literatura [6]. Esta duración que se obtenía a su vez con la geometría de la PC1 se mantendrá fija para el resto de combinaciones y para los dos puntos de funcionamiento diferente al igual que en el capítulo 4.

El resto de parámetros correspondientes a la liberación de calor en la cámara principal, presión y temperatura de entrada en el momento que comienza el ciclo cerrado y los porcentajes de aire-fuel introducidos se mantendrán fijos a los obtenidos en las simulaciones del capítulo anterior y procedentes de las campañas experimentales.

5.2.1.1. Resultados en alta carga/régimen

En primer lugar, se va a volver a analizar el punto de funcionamiento en el que el régimen de giro es alto y la carga introducida también. Como se vio, se trata de un punto en el que el llenado y vaciado de la precámara de manera eficiente es clave. El elevado régimen de giro lleva a que haya poco tiempo para realizar el proceso de combustión. Además, la alta carga podría producir autoinflamaciones. Sin embargo, las altas velocidades de combustión frenan esta posible aparición.

A continuación se van a observar, los resultados obtenidos de operar con gas natural y amoniaco tras aumentar las velocidades de combustión en la precámara y reducir la duración del proceso al mismo tiempo que se lograba con gasolina en las mismas condiciones.

Se volverá a atender a parámetros fundamentales del buen funcionamiento del encendido por precámara como la cantidad de momento y el tiempo en el que el chorro más alejado alcanza la pared. Se espera una mejora en los valores de estos gracias a la implementación de la nueva tecnología de ignición.

- **Gas natural**

Anteriormente se visualizó, como se esperaba por su menor velocidad de combustión laminar, una disminución de las prestaciones del concepto TJI frente a este combustible. Se obtuvieron valores de momento muy lejanos a los logrados con metanol o gasolina. Por ello, se creía necesaria la introducción de alguna innovación como la sustitución de la bujía convencional por estos sistemas avanzados de encendido de alta energía.

Una vez igualada esta duración de la combustión en la precámara gracias al mayor aporte de energía por parte de este nuevo sistema, y trabajando, como durante todo el proyecto, en condiciones de un mismo aporte de energía por parte del combustible con la modificación de la presión de entrada, se espera un gran aumento de las prestaciones. A continuación, en la figura 5.2.1.1.1, se muestran los valores obtenidos para la cantidad de momento y t^* con estas nuevas condiciones.

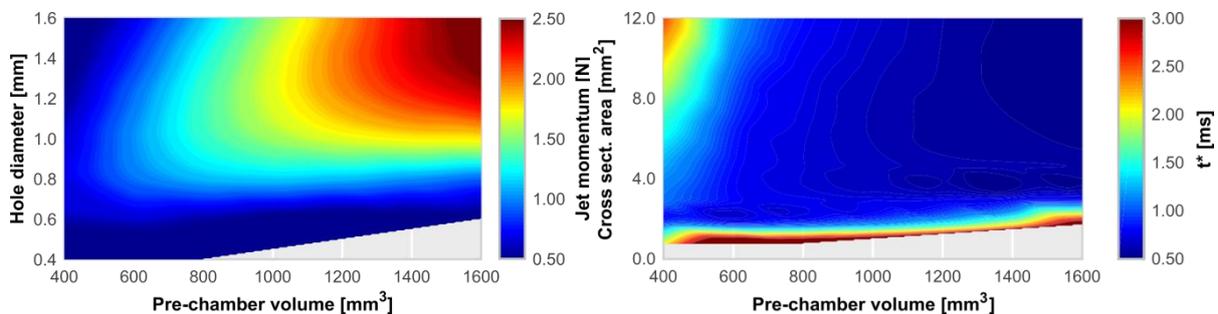


Figura [5.2.1.1.1]: Mapas de máxima cantidad de momento a la izquierda y t^* a la derecha frente al volumen de la precámara y el diámetro de los orificios para el gas natural a alta carga/régimen con un sistema avanzado de encendido.

En cuanto a la cantidad de momento, se observa una distribución muy similar a las mostradas a lo largo de todo el proyecto. Como habitualmente, este momento se hace mayor con un aumento del volumen de la precámara por la posibilidad de disponer de mayor cantidad de mezcla al comienzo de la combustión y se optimiza para cada volumen con cierto diámetro de orificios que no impida la entrada de la mezcla y que a su vez ayude a una presurización adecuada de esta. Además, se mantienen los cuatro casos en los que no se produce eyección con volúmenes grandes y el menor de los diámetros de orificio que impiden la entrada de la suficiente cantidad de mezcla.

Sin embargo, las diferencias con la simulación con gas natural en este punto en el capítulo anterior se encuentran como se preveía en la escala de valores que se vuelve a aproximar a la obtenida con gasolina como era el objetivo y en el aumento de los diámetros de orificios óptimos para cada volumen. La disminución de la duración de la combustión en la precámara posibilita una mayor presurización de esta y los diámetros tan pequeños ya no se antojan imprescindibles.

Por otro lado el mapa de tiempos de barrido de la cámara principal se muestra más azul que su análogo, con menores tiempos. En este caso la geometría óptima se trata de aquella con el volumen más alto, como generalmente, y diámetro de orificios de 1.4mm con un tiempo de barrido muy cercano a 0.5ms. La esquina superior izquierda, para geometrías de volúmenes pequeños y diámetros de orificios altos, que anteriormente se encontraba con muchos problemas de barridos incluso con tiempos por encima de 3ms ahora se aclara. En la siguiente figura (5.2.1.1.2) se visualizará las diferencias entre la penetración que se produce al operar con gas natural en estas condiciones con el nuevo sistema de ignición y la que se obtenía anteriormente con una bujía convencional.

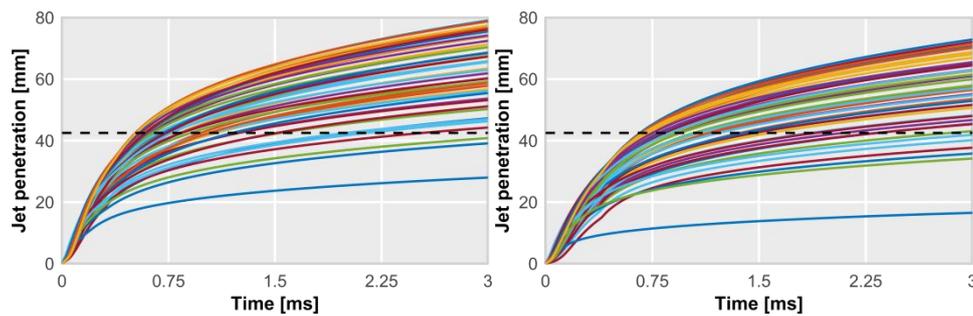


Figura [5.2.1.1.2]: Figuras de penetración de los casos con un sistema avanzado de encendido de alta energía a la izquierda y con bujía convencional a la derecha a alta carga/régimen para el gas natural.

Se observa que la sustitución de la bujía convencional por esta nueva tecnología ha permitido que sean menos casos los que no sean capaces de barrer la cámara principal en un tiempo menor a 3ms. Además en una tónica general, en todas las combinaciones de geometría el chorro más alejado alcanza la pared del cilindro en un tiempo menor desplazándose la figura hacia la izquierda en el caso en el que se tiene un sistema avanzando de encendido y llegando a cotas de penetración más elevadas.

- **Amoniaco**

Operando con amoniaco, en el capítulo 4 se vio como ni siquiera la precámara era capaz de eyectar chorros reactivos a la cámara principal y encender esta. Las prestaciones del concepto con este eran nefastas y, por ello, se necesitaba de alguna alternativa para seguir considerándolo.

La combustión en la precámara con este era tan lenta que no se conseguía presurizar esta con respecto a la cámara principal. Por lo tanto, el objetivo de seguir contando con el amoniaco como una alternativa para este tipo de motores pasaba obligatoriamente por el aporte de mayor energía al combustible. El nuevo sistema de ignición será el encargado de contrarrestar su muy baja velocidad de combustión laminar y proporcionar al proceso que ocurre en la precámara la rapidez necesaria para igualar su duración nuevamente a la del mismo proceso con gasolina.

Nuevamente, se espera que, con la nueva velocidad, se consigan ya no sólo un adecuado funcionamiento consiguiendo eyectar, sino que resultados satisfactorios que puedan competir con el resto de combustibles. A continuación, en la figura 5.2.1.1.3, se muestra el perfil de la cantidad de momento que atraviesa uno de los orificios para la geometría de precámara de 1600mm^3 y 1.4mm .

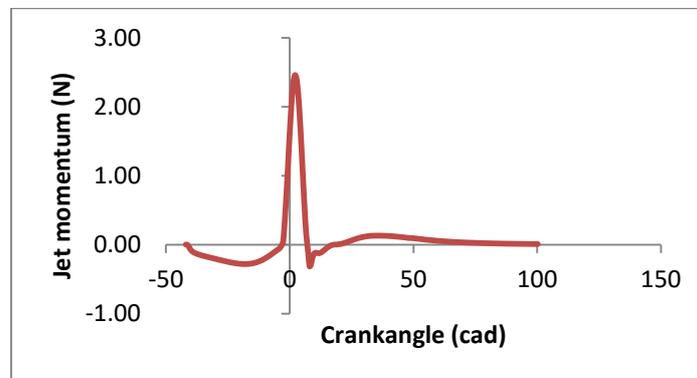


Figura [5.2.1.1.3]: Perfil de la cantidad de momento para amoniaco a alta carga/régimen para una geometría de precámara de 1600mm^3 y 1.4mm de diámetro de orificios con un sistema avanzado de encendido.

En este caso se observa como sí que se produce eyección, a diferencia de lo que ocurría en la misma situación con un encendido mediante la bujía convencional. Una vez se ha realizado el llenado, etapa donde el momento es negativo con la mezcla entrando desde el cilindro a la precámara, y tras saltar la chispa se comienza a hacer positivo este parámetro comenzando la eyección y posteriormente alcanzando un pico. Este ya se trata de un comportamiento adecuado del concepto frente a este combustible.

Una vez se ha observado como gracias a la nueva tecnología para el encendido en la precámara se ha conseguido que el concepto sea capaz de trabajar adecuadamente, en la siguiente figura (5.2.1.1.4) se visualizan los valores obtenidos de máxima cantidad de momento y tiempo que tarda el chorro más alejado en alcanzar la pared del cilindro.

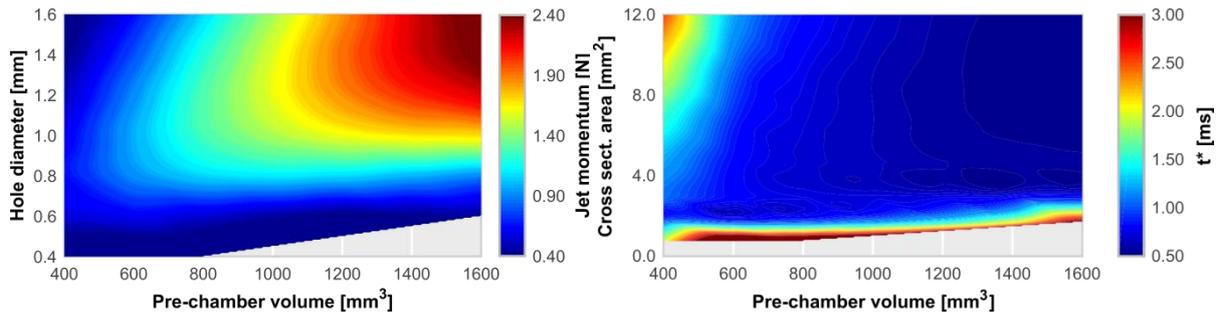


Figura [5.2.1.1.4]: Mapas de máxima cantidad de momento a la izquierda y t^* a la derecha frente al volumen de la precámara y el diámetro de los orificios para el amoniaco a alta carga/régimen con un sistema avanzado de encendido.

El comportamiento observado anteriormente con el gas natural se asemeja mucho al mostrado en este momento con amoniaco. Se visualiza un mapa de momentos con la distribución habitual ya comentada y explicada y una escala de valores muy poco por debajo de la de gas natural. Por lo tanto, se vuelve a observar como se aproximan mucho las prestaciones tras la incorporación del sistema de ignición de alta energía a las obtenidas con gasolina con la bujía convencional. Siguen apareciendo los mismos casos sin eyección cuando la geometría de la precámara se trata de una con un volumen grande y el menor de los diámetros de orificio.

Por otro lado, se observa un mapa de tiempos de barrido de la cámara principal también muy similar al de gas natural anteriormente. Son pocas geometrías las que llevan a barridos por encima de 3ms. En este grupo están, como generalmente, las combinaciones con los diámetros más pequeños. El menor de los volúmenes con los diámetros de orificios más grandes también llevan a t^* mayores, pero el resto del mapa se encuentra con valores muy pequeños. La geometría óptima vuelve a ser la misma que con gas natural en una combinación de 1600mm^3 de volumen y 1.4mm de diámetro de orificios que, otra vez, aproxima el tiempo en el que el chorro más alejado alcanza la pared a un valor muy cercano a 0.5ms .

5.2.1.2. Resultados en baja carga/régimen

Vuelve a ser fundamental analizar un punto de funcionamiento totalmente opuesto al anterior en el que el régimen de giro es muy bajo y la carga introducida también para simular la amplitud del rango de giro de un MEP. Se trata de un punto en el que las deficiencias de estos combustibles más lentos aún se pueden ver más acusadas debido a la poca cantidad de combustible que compromete el inicio de la combustión en la precámara.

Por ello, se prevé que la nueva tecnología de ignición en este punto tome más importancia para compensar las peores condiciones que se encuentran en el interior de la precámara al comienzo de la combustión. A continuación, se van a mostrar los resultados obtenidos con este concepto al operar con gas natural y amoniaco pero, al igual que a alta carga/régimen, esta vez igualando la velocidad de combustión y, por tanto, su duración a la de la gasolina con bujía convencional gracias a la nueva tecnología.

- **Gas natural**

Con la bujía convencional las prestaciones con gas natural a baja carga/régimen eran muy bajas. Los valores de cantidad de momento rebajaban mucho los de metanol o gasolina y se consideraba aún más necesario en este punto este nuevo sistema de ignición para levantarlos y evitar incluso problemas de encendido al igual que ocurría con el amoniaco. A continuación, en la figura 5.2.1.2.1, se muestran los nuevos valores obtenidos tanto de este parámetro como de t^* en estas nuevas condiciones.

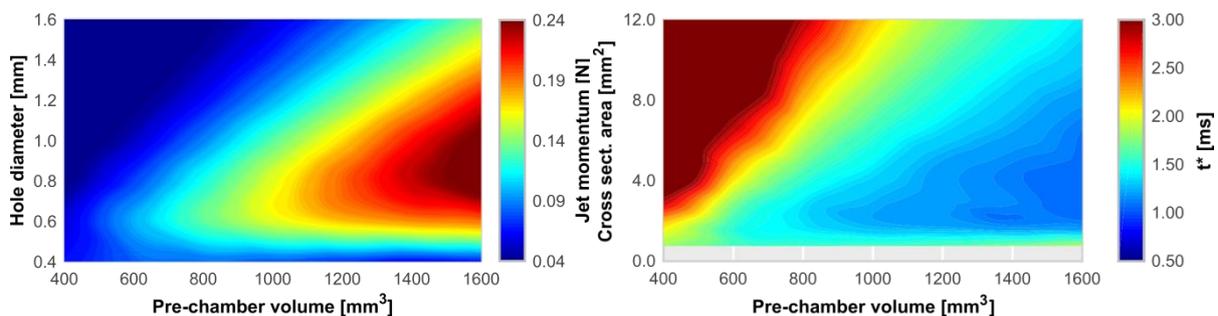


Figura [5.2.1.2.1]: Mapas de máxima cantidad de momento a la izquierda y t^* a la derecha frente al volumen de la precámara y el diámetro de los orificios para el gas natural a baja carga/régimen con un sistema avanzado de encendido.

Se vuelve a visualizar como, propio de las condiciones del punto de funcionamiento, tanto la cantidad de momento como el tiempo que tardan los chorros en alcanzar la pared empeoran mucho. Sin embargo, comparando estos con los propios a baja carga/régimen pero con bujía convencional sí que mejoran y se sitúan más cerca de los obtenidos con gasolina. Ambos mapas siguen la distribución habitual de este punto de funcionamiento. Los diámetros óptimos disminuyen ya que no es tan fundamental la permisión para que entre más mezcla a la precámara, al ser menos cantidad la que se dispone a ello, y sí la presurización de esta.

No se encuentran combinaciones de geometría cuyas prestaciones empeoren tanto que no se consiga eyectar. Pero sí se puede visualizar como la esquina superior izquierda, con volúmenes pequeños y diámetros elevados, empeora mucho el comportamiento del concepto. La poca cantidad de mezcla encontrada en el interior de la precámara al inicio de la combustión junto con la menor presurización que permiten los diámetros elevados reproducen estos resultados con momentos máximos muy cercanos a 0 y tiempos de barridos superiores a 3ms. El punto óptimo se visualiza en una combinación de 1600mm^3 de volumen y 0.8mm de diámetro de orificios en los que los tiempos son muy cercanos a 1ms.

- **Amoniaco**

En el caso del amoniaco, este resulta un punto clave en el que además de las bajas propiedades del amoniaco para la combustión aparecen las condiciones de este punto de funcionamiento que no le ayudan. Con un mayor motivo que a alta carga/régimen, en este punto este encendido por precámara no era capaz de inyectar chorros reactivos a la cámara principal con este combustible y una bujía convencional.

El sistema avanzado de encendido tendrá que contrarrestar estas malas condiciones tanto del propio combustible como del punto de funcionamiento. Se muestra en la siguiente figura (5.2.1.2.2) si el concepto esta vez es capaz de eyectar con estas nuevas condiciones bajo la geometría de precámara que se mostró en el capítulo anterior en estas mismas condiciones.

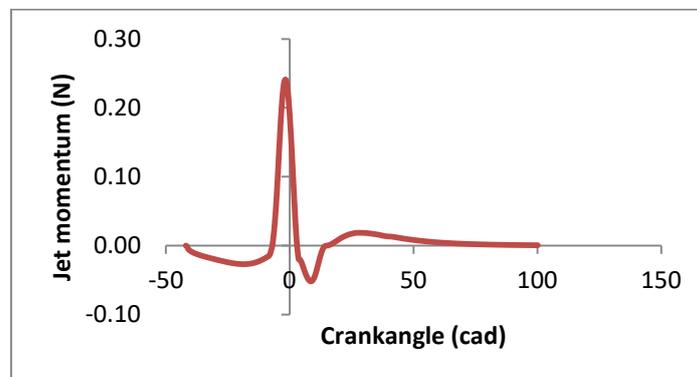


Figura [5.2.1.2.2]: Perfil de la cantidad de momento para amoniaco a baja carga/régimen para una geometría de precámara de 1600mm^3 y 0.8mm de diámetro de orificios con un sistema avanzado de encendido.

A baja carga/régimen se vuelve a observar como la nueva tecnología de ignición cambia el comportamiento del sistema ante este combustible. Se visualiza como ahora el proceso de eyección sí que se lleva a cabo gracias a una combustión más adecuada dentro de la precámara.

Se ha observado que esta vez en la precámara si que se reúnen las condiciones necesarias para que esta sea capaz de presurizarla y de posteriormente eyectar los chorros reactivos para iniciar la combustión en la cámara principal. Seguidamente se muestran los resultados de máxima cantidad de momento y tiempos de penetración en estas nuevas condiciones para cada caso en la figura 5.2.1.2.3.

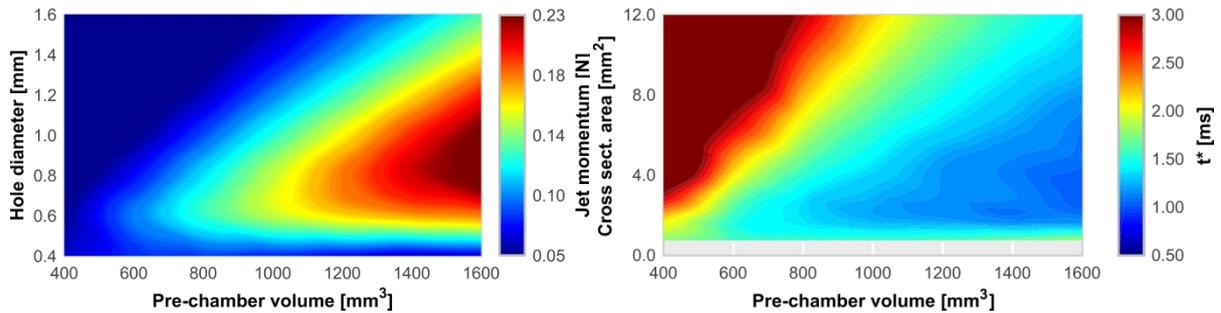


Figura [5.2.1.2.3]: Mapas de máxima cantidad de momento a la izquierda y t^* a la derecha frente al volumen de la precámara y el diámetro de los orificios para el amoniaco a baja carga/régimen con un sistema avanzado de encendido.

Al igual que ocurría con el gas natural, se vuelven a observar valores menores de ambos parámetros por las condiciones del punto de funcionamiento. Sin embargo, el objetivo se vuelve a lograr y el concepto se aproxima en prestaciones a las logradas con gasolina operando con amoniaco cuando se implementa la nueva tecnología de ignición.

La distribución y las escalas de los mapas son totalmente similares a los observados con gas natural en la figura 5.2.1.2.1. Los diámetros de orificios óptimos disminuyen para cada volumen y se vuelven a encontrar problemas en las configuraciones de volúmenes pequeños y diámetros grandes. El óptimo operando con amoniaco a baja carga/régimen en estas condiciones se encuentra igualmente en el caso de 1600mm^3 de volumen y 0.8mm de diámetro de orificios en los que se haya un tiempo de penetración muy poco superior a un 1ms .

5.2.2. Relevancia de los Parámetros Relativos al Proceso de Combustión en la Precámara

Una menor duración de la combustión en la precámara se acaba de ver como mejora la operación de este motor con un sistema de encendido TJI. Por lo tanto, en este punto se pretende observar como, efectivamente, este parámetro y el momento en el que se alcanza la mitad de la combustión en la precámara (comb_tim_pc), dependiente del anterior y del salto de la chispa (spark_tim), influyen en el proceso.

Para ello, se ha llevado a cabo un estudio en el que el modelo opera con gasolina como combustible y a baja carga/régimen. Este se efectuará bajo una matriz en la que se modificarán los dos parámetros relativos a la combustión en la precámara mencionados como son la duración de la combustión en la precámara (*burnduration_pc*) y el salto de la chispa. En la siguiente tabla (9), se encuentran las combinaciones posibles que se han calculado.

Tabla 9. Matriz de simulaciones modificando la duración de la combustión en la precámara y el salto de la chispa (DOE2).

	Valor mín.	Valor máx.	Nº niveles
burnduration_pc (cad)	5	15	11
spark_tim (cad aTDC)	-26	-5	8

La duración de la combustión se toma como valor mínimo 5 grados de cigüeñal que se trataría de un proceso rapidísimo y 15 grados como máximo a partir de los cuales podrían aparecer problemas en el comportamiento del motor. Para el salto de la chispa, cuyas unidades se tratan del ángulo del cigüeñal respecto al PMS, se han barrido valores aceptables. La geometría de precámara utilizada para esta simulación es la correspondiente a la de la PC1 que se mantiene fija al igual que el resto de parámetros como se comentó.

A continuación, en la figura 5.2.2.1 se van a mostrar los valores obtenidos en cuanto a máxima cantidad de momento y tiempo de penetración para las distintas combinaciones de estos parámetros.

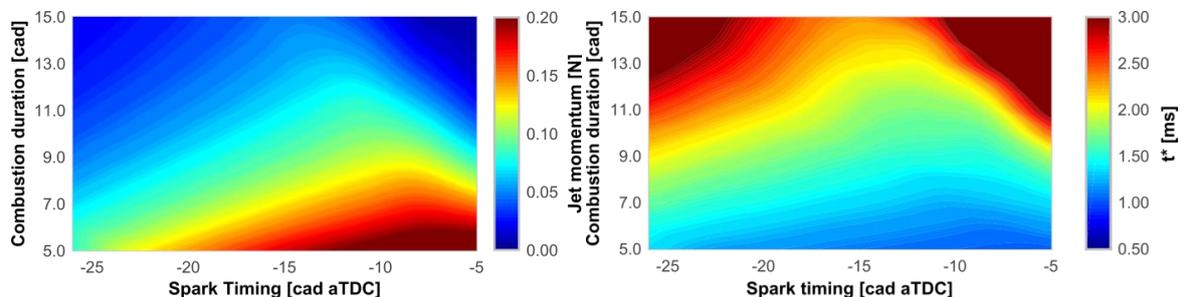


Figura [5.2.2.1]: Mapas de máxima cantidad de momento a la izquierda y t^* a la derecha frente al salto de la chispa (*Spark Timing*) y la duración de la combustión en la precámara (*Combustion duration*) para la gasolina a baja carga/régimen.

Como cabía de esperar por los estudios llevados a cabo a lo largo de todo el proyecto, los mayores momentos se obtienen en casos en los que la duración de la combustión en la precámara es la más corta. Para un mismo ángulo de salto de chispa, a medida que se puede realizar un proceso de combustión más rápido las prestaciones del concepto son mayores, ya que la presurización del interior de la precámara aumenta.

El ángulo en el que hacemos saltar la chispa también es determinante en la operación del motor. Para cada duración de la combustión en la precámara se visualiza un determinado momento para encender la mezcla que optimiza el proceso. Se observa un aumento de la cantidad de momento a medida que acercamos el salto de la chispa al PMS (se permite entrar más cantidad de mezcla como posteriormente se verá) hasta cierto ángulo en el que retrasar aún más esta chispa lleva a peores resultados.

Además, se observa que este salto de chipa que optimiza el proceso frente a la duración de la combustión tiene una tendencia diagonal, acercándose más al PMS cuanto menor es la duración de la combustión. Esta tendencia se puede aproximar a la siguiente recta (5.2.2.1):

$$Spark_tim = \left(-\frac{8}{11}\right) * burnduration_pc - \frac{59}{22}, \quad (5.2.2.1)$$

Además de conseguir la entrada de una gran cantidad de mezcla y una mejor presurización de la precámara, es importante el centrado de este proceso de combustión en el interior de ella. Los mejores valores se obtienen cuando la eyección comienza unos pocos grados, dependiendo de la duración de la combustión, antes del PMS. Por ejemplo, pasando de una duración de 15cad a 5cad pasamos de tener el momento óptimo de salto de chispa en el ángulo -13.6 al -6.3, acercándolo al PMS, en ese intento de siempre centrar la combustión en la precámara entorno a unos grados anteriores a este.

En cuanto al mapa de t^* , se observa una distribución idéntica a la cantidad de momento. Los valores de tiempo en el que el chorro más alejado alcanza la pared del cilindro también se adecúan a los propios en el punto de funcionamiento de baja carga/régimen. Para explicar de una forma más detallada la distribución de ambos mapas se muestran en la figura 5.2.2.2, los mapas correspondientes al gasto másico y a la velocidad de los chorros (parámetros de los que depende el momento) cuando se produce el proceso de eyección.

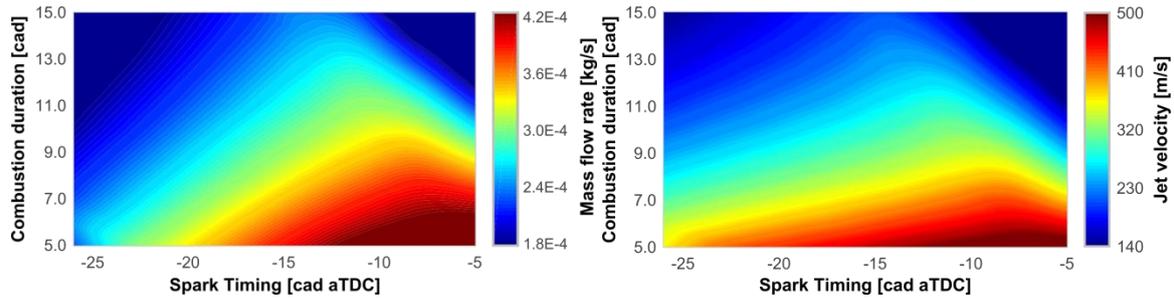


Figura [5.2.2.2]: Mapas de gasto másico a la izquierda y velocidad del chorro a la derecha frente al salto de la chispa y la duración de la combustión en la precámara para la gasolina a baja carga/régimen.

Ambos mapas muestran una distribución similar entre ellos y al mapa de máxima cantidad de momento como se podía esperar, ya que estos parámetros son de los que depende el último. Por un lado, el gasto másico aumenta a medida que disminuye la duración de la combustión. Este parámetro dependía, en su ecuación (4.3.3.2), de la velocidad de los chorros reactivos que en su mapa, a la derecha, vemos como su tendencia es más plana y muy influyente de esta duración de la combustión en la precámara aumentando cuando esta disminuye, debido a la mayor presurización que se produce en el interior de ella.

Por otro lado, al igual que ocurría en el mapa de cantidad de momento, el gasto másico también está afectado por el salto de la chispa. Un mayor retraso en el salto de la chispa permite la entrada de mezcla durante mayor tiempo a la precámara. Este mayor retraso optimiza el gasto másico hasta cierto momento en el que el movimiento del pistón descendiente fuerza a que salga masa de la precámara. Se observa la misma correlación entre los parámetros en la que para cada duración de la combustión hay un determinado salto de chispa que optimiza las prestaciones, del mismo valor al hallado anteriormente.

La velocidad de los chorros reactivos, como se ha comentado, sigue una distribución similar pero es aún más influyente de la duración de la combustión. Se mantienen la relación entre los parámetros para optimizar la cantidad de momento, no obstante, la tendencia del mapa es más plana. Incluso en puntos con un salto de chispa muy adelantado se pueden visualizar velocidades muy cercanas a las máximas con la menor duración de la combustión y su correspondiente salto de chispa que maximiza las prestaciones del concepto.

5.3. CONCLUSIONES

El objetivo que se marcó al comienzo del capítulo se ha conseguido y, por tanto, la principal conclusión que se puede extraer es la mejora de las prestaciones de un encendido por precámara de tipo pasivo cuando se sustituye la bujía convencional por otro sistema avanzado de ignición de alta energía.

Siendo capaz de igualar la duración de la combustión en la precámara de combustibles más lentos, como el gas natural y el amoniaco, a la de la gasolina gracias a esta tecnología, se ha visto como los primeros son capaces de proporcionar resultados muy parecidos al último. Y, por lo tanto, en este momento se les puede volver a considerar alternativas.

Por último, se llevó a cabo un estudio en el que se modificaban los parámetros relativos a la combustión en la precámara para ver cómo la afectaban. Se modificó además de la duración de la combustión en esta, el momento del salto de la chispa. Se visualizó como una menor duración de la combustión mejoraba las prestaciones a partir de una mayor presurización en la precámara. En cuanto al salto de la chispa, un mayor retraso ayudaba a que entrara mayor mezcla a la precámara y también se optimizara la operación, pero siempre hasta determinado instante en el que volvía a empeorar. Esto se producía por la necesidad de centrar el proceso de eyección desde la precámara a la cámara principal en instantes próximos al PMS.

6

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES FINALES Y TRABAJOS FUTUROS

CONTENIDO:

- 6.1. CONCLUSIONES FINALES
- 6.2. TRABAJOS FUTUROS

6.1. CONCLUSIONES FINALES

Este proyecto se ha centrado en el estudio de un sistema de encendido por precámara de tipo pasivo para MEP. Una vez que se ha pasado por todas las etapas necesarias para llevarlo a cabo es el momento de analizar las conclusiones que se pueden extraer.

El futuro de los MCIA pasa inevitablemente por procesos de mejora y adaptación en este momento en el que la contribución de estos a la contaminación, en especial al cambio climático con la emisión de CO₂, es alta. Están apareciendo desde hace años alternativas a estos como los motores eléctricos, pero se demostró que, a día de hoy, siguen siendo motores que se encuentran en muy bajo número en los vehículos que hoy en día compran los consumidores.

Además, estos MCIA y en concreto un MEP tiene un gran margen de mejora en cuestión de su rendimiento. Por ello, en este sentido se consideró interesante estudiar en este tipo de motores un sistema de encendido por precámara de tipo pasivo que emplea la tecnología TJI. Por la literatura utilizada para el presente proyecto se conocía de sus numerosas ventajas para mejorar el proceso de combustión, disminuyendo su duración. Se sirve de un encendido de la cámara principal con múltiples puntos de ignición gracias a una serie de orificios que las conectan que le ayuda a ello.

Se consideró este un sistema que sería capaz de permitir a un MEP trabajar con diluciones de la mezcla, ya sea mediante aire o EGR, o relaciones de compresión más altas que eran objetivos actuales de los investigadores.

Tras esta primera etapa de documentación, viendo este sistema como muy prometedor, se pasó a llevar a cabo las campañas de simulaciones con las herramientas disponibles. Aunque se dispone de una instalación experimental totalmente equipada con la que ensayar todo tipo de condiciones de operación que se desee, el software de simulación GT-SUITE resultó fundamental. Gracias a este, en el que se es capaz de realizar un modelo 1D del motor físico cuyos resultados son muy precisos, se reduce mucho el tiempo de las simulaciones y, con ello, los costes.

Además, ante la imposibilidad de disponer de determinados sensores como, por ejemplo, en el interior de la precámara por su reducido volumen y, por tanto, obtener datos del proceso ocurrido en este lugar, volvía a ser muy determinante el modelo. Se trabajó con un modelo más reducido en el que se eliminaron las líneas de admisión y escape, ya que el mayor interés estaba en el proceso de eyección desde la precámara a la cámara principal. Este proceso es fundamental para la buena operación del concepto.

Así, el primer paso era corroborar la precisión de este modelo simple 1D antes de comenzar las campañas de simulaciones. Se llevaron a cabo dos simulaciones análogas tanto en el motor experimental como en el modelo numérico, una sin EGR y otra con un 15% de EGR, y se demostró el ajuste que se produjo entre ambos resultados. El error que se producía entre ellos era despreciable. A partir de este momento, se estaba preparado para realizar las simulaciones.

Este proyecto se centró en examinar la operación del motor utilizando este sistema de encendido, pero no sólo ante el combustible típicamente empleado en los MEP, sino que también ante tres combustibles alternativos más, gas natural, metanol y amoniaco. En primer lugar, se examinó las características de estos combustibles.

En cuanto a la combustión, se calcularon las velocidades de combustión laminares de los cuatro combustibles y se obtuvo que era el metanol el que mayor velocidad tenía incluso por encima de la gasolina. Los combustibles más lentos eran el gas natural y el amoniaco. Este parámetro es determinante para establecer la duración de la combustión en la precámara frente a la gasolina y prever de cuáles de estos se podían esperar mejores prestaciones.

Se analizaron también aspectos correspondientes a la contaminación. Por literatura se conocía de la menor emisión de este tipo de sustancias en la operación por parte de los combustibles alternativos, sobre todo referente al CO₂, gracias a su menor contenido en carbono. Sin embargo, se consideró importante realizar un estudio a lo largo de un proceso completo del combustible y frente a diferentes aspectos. El gas natural se trata del combustible más limpio en cuanto al cambio climático y el metanol y el amoniaco, considerando que se obtenían a partir de gas natural (proceso habitual), se vio que no mejoraban a la gasolina. Sin embargo, si este amoniaco se obtenía a partir de recursos renovables, se colocaba como la mejor alternativa para reducir la huella de carbono. Por otro lado, un aspecto negativo de combustibles como el amoniaco y el metanol es su alta toxicidad.

A continuación, se implementaron los cuatro combustibles en el modelo y se analizó el comportamiento del encendido por precámara frente a ellos mediante el proceso de eyección. Además, estos estudios se llevaron a cabo bajo dos puntos de funcionamiento opuestos, alta y baja carga/régimen, y modificando parámetros relativos a la geometría de la precámara, volumen de esta y diámetro de los orificios.

En cuanto a cuestiones generales se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Se visualizó como se mejoraban las prestaciones del sistema a medida que se aumentaba el volumen, ya que se disponía de mayor cantidad de mezcla al inicio de la combustión. Sin embargo, para igualdad de mezcla se produce una mayor presurización de la precámara con un volumen más pequeño, por lo que estos son preferibles. Además, hay que tener en cuenta el ensamblado de esta en la culata.
- Para cada volumen se encontraba un diámetro de orificios óptimo que permitía la entrada de la mezcla sin dificultad y que, además, era lo suficientemente pequeño para conseguir una adecuada presurización del interior de la precámara.
- A alta carga/régimen, como se preveía, por su condición de introducir mayor cantidad de mezcla al interior del cilindro, se consiguen mucho mejores prestaciones.
- Referido a los diferentes combustibles, pero con carácter general, cuanto más rápida es la combustión en la precámara, también lleva a que los diámetros de orificios óptimos aumenten, ya que no es tan necesaria la alta presurización de esta que la produce la propia rapidez del proceso.

En cuanto a la operación de los diferentes combustibles, las mejores prestaciones del sistema se obtuvieron trabajando con metanol, como se preveía por su mayor velocidad de combustión laminar, cerca de las logradas con gasolina. El gas natural empeoró a casi a la mitad los valores obtenidos de cantidad de momento y tiempo de penetración. Por su parte, el comportamiento del sistema frente al amoniaco no fue bueno e incluso no se llegaba a observar el proceso de eyección ni a alta carga/régimen.

En una segunda campaña de simulaciones se pretendía recuperar las prestaciones de los combustibles más lentos. Se logró el objetivo tanto a alta como a baja carga/régimen gracias a un sistema avanzado de ignición de alta energía que sustituía a la bujía convencional para encender la mezcla en el interior de la precámara. Se partió de la hipótesis en la que con esta nueva tecnología tanto el gas natural como el amoniaco eran capaces de igualar la duración de la combustión en la precámara a la obtenida de utilizar gasolina con una bujía convencional. Con ello, ambos combustibles aproximaban sus prestaciones a las obtenidas con el último. El amoniaco pasaba de no conseguir eyectar a poder considerarlo otra vez una alternativa.

Además se realizó un estudio operando con gasolina a baja carga/régimen en el que se modificaban dos parámetros relativos a la combustión en la precámara para ver cómo afectaban estos a los resultados del sistema. Se modificó, por un lado, la duración de la combustión en la precámara y a menores tiempos de combustión reproducía mejores resultados gracias a una presurización más óptima. Y por el otro, se modificó el momento del salto de la chispa que a un mayor retraso mejoraba también las prestaciones permitiendo la entrada de mayor cantidad de mezcla antes de iniciar el proceso. Pero se llegaba a un retraso óptimo a partir del cual volvían a empeorar los resultados. Se vio que era importante el centrado de la eyección en unos grados anteriores al PMS y que cuanto menor era la duración de la combustión en la precámara el óptimo del salto de la chispa estaba más retrasado.

Por ello, como conclusión final se puede hablar de lo fundamental que es conseguir un proceso de combustión lo más rápido posible. En este caso se ha estudiado desde sistemas avanzados de ignición, pero sería un estudio compatible a, por ejemplo, dopar el amoniaco con hidrógeno (muy empleado actualmente) para aumentar su velocidad laminar de combustión. En definitiva, cualquier estrategia que acelere la velocidad de combustión tendrá los mismos efectos positivos en cuanto a cantidad de momento y tiempo de penetración.

6.2. TRABAJOS FUTUROS

Este proyecto significa un pequeño paso dentro de un objetivo tan grande como es la investigación que se está realizando sobre este concepto TJI desde hace muchos años. Este sistema de encendido resulta muy prometedor para el futuro de los MEP, pero hay que seguir sometiéndolo a diferentes estudios hasta que su inclusión en los motores del futuro sea un hecho. Por supuesto, queda mucho trabajo por hacer, aunque es verdad que los resultados son muy prometedores y están avanzados. La investigación va por muy buen camino y se confía en que este sistema sea capaz de mejorar las prestaciones que se conocían de este tipo de motores hasta ahora y hacerse un hueco en el mercado.

En lo que respecta al presente proyecto, se pueden mencionar varias investigaciones que se pueden llevar a partir de este:

- Una vez se han analizado los resultados de la implementación de distintos combustibles y sus ventajas e inconvenientes, sería muy importantes llevar estos a la experimentación. Operar con ellos en el motor físico fuera de toda hipótesis adoptada a lo largo del proyecto sería fundamental. Se podría corroborar la eyección estudiada con cada uno de ellos, además de otros aspectos como el rendimiento global, la contaminación en la operación...
- Resultaría también interesante llevar a cabo estudios con ciertas diluciones, tanto por aire o por EGR, para comprobar el comportamiento ante estas situaciones y los límites a los que se llega. Incluso aumentos de la relación de compresión, hasta puntos donde sea inviable por la autoinflamación.
- Por el lado de los combustibles, fuera de la cuestión de la operación en motores, su producción más limpia también sería muy relevante estudiarla.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Prof.F.Payri y Prof.J.M.Desantes. (2011). *Motores de Combustión Interna Alternativos*. Universidad Politécnica de Valencia.
- [2] International Energy Agency. (2019). *CO2 Emissions from Fuel Combustion 2019*. OECD Publishing.
- [3] Zhang, T. (2015). Possibilities of Alternative Vehicle Fuels: a literature review.
- [4] Saraswat, M., Gadi, R., Arora, A., & Bansal, M. (2015). Assessment of different alternative fuels for internal combustion engine: A review. *International Journal of Engineering Research & Management Technology*, 2.
- [5] <https://www.ngva.eu/medias/going-beyond-well-to-wheel-life-cycle-emissions/>
- [6] ZHENG, M., & Shui, Y. U. (2015). Advanced ignition systems for future clean combustion engines. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 6(04), 295.
- [7] Alvarez, C. E. C., Couto, G. E., Roso, V. R., Thiriet, A. B., & Valle, R. M. (2018). A review of prechamber ignition systems as lean combustion technology for SI engines. *Applied Thermal Engineering*, 128, 107-120.
- [8] Toulson, E., Schock, H. J., & Attard, W. P. (2010). A review of pre-chamber initiated jet ignition combustion systems.
- [9] Attard, W. P., Bassett, M., Parsons, P., & Blaxill, H. (2011). *A new combustion system achieving high drive cycle fuel economy improvements in a modern vehicle powertrain* (No. 2011-01-0664). SAE Technical Paper.
- [10] Attard, W. P., & Parsons, P. (2010). A normally aspirated spark initiated combustion system capable of high load, high efficiency and near zero NOx emissions in a modern vehicle powertrain. *SAE International Journal of Engines*, 3(2), 269-287.
- [11] Attard, W. P., & Blaxill, H. (2012). A single fuel pre-chamber jet ignition powertrain achieving high load, high efficiency and near zero NOx emissions. *SAE International Journal of Engines*, 5(3), 734-746.
- [12] López, J. J., Novella, R., Gomez-Soriano, J., Martinez-Hernandez, P. J., Rampanarivo, F., Libert, C., & Dabiri, M. (2021). Advantages of the unscavenged pre-chamber ignition system in turbocharged natural gas engines for automotive applications. *Energy*, 218, 119466.
- [13] Benajes, J., Novella, R., Gómez-Soriano, J., Martinez-Hernandez, P. J., Libert, C., & Dabiri, M. (2019). Evaluation of the passive pre-chamber ignition concept for future high compression ratio turbocharged spark-ignition engines. *Applied Energy*, 248, 576-588.
- [14] Novella, R., Gomez-Soriano, J., Martinez-Hernandez, P. J., Libert, C., & Rampanarivo, F. (2021). Improving the performance of the passive pre-chamber ignition concept for spark-ignition engines fueled with natural gas. *Fuel*, 290, 119971.
- [15] Benajes, J., Novella, R., Gomez-Soriano, J., Martinez-Hernandez, P., Libert, C., & Dabiri, M. (2019). Performance of the passive pre-chamber ignition concept in a spark-ignition engine for passenger car applications. *SIA Powertrain & Electronics*.

- [16]** Li, Q., Zhang, W., Jin, W., Xie, Y., & Huang, Z. (2016). Laminar flame characteristics and kinetic modeling study of methanol-isooctane blends at elevated temperatures. *Fuel*, *184*, 836-845.
- [17]** Hu, E., Li, X., Meng, X., Chen, Y., Cheng, Y., Xie, Y., & Huang, Z. (2015). Laminar flame speeds and ignition delay times of methane–air mixtures at elevated temperatures and pressures. *Fuel*, *158*, 1-10.
- [18]** Otomo, J., Koshi, M., Mitsumori, T., Iwasaki, H., & Yamada, K. (2018). Chemical kinetic modeling of ammonia oxidation with improved reaction mechanism for ammonia/air and ammonia/hydrogen/air combustion. *International Journal of Hydrogen Energy*, *43*(5), 3004-3014.
- [19]** Balki, M. K., & Sayin, C. (2014). The effect of compression ratio on the performance, emissions and combustion of an SI (spark ignition) engine fueled with pure ethanol, methanol and unleaded gasoline. *Energy*, *71*, 194-201.
- [20]** Bicer, Y., & Khalid, F. (2020). Life cycle environmental impact comparison of solid oxide fuel cells fueled by natural gas, hydrogen, ammonia and methanol for combined heat and power generation. *International Journal of Hydrogen Energy*, *45*(5), 3670-3685.
- [21]** Bilgili, L. (2021). Comparative assessment of alternative marine fuels in life cycle perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *144*, 110985.

DOCUMENTO II

PRESUPUESTO

1

PRESUPUESTO DEL PROYECTO

CONTENIDO:

1. INTRODUCCIÓN
2. CUADROS DE PRECIOS BÁSICOS
 - 2.1. MANO DE OBRA
 - 2.2. MATERIALES INFORMÁTICOS
 - 2.3. MATERIALES FUNGIBLES
 - 2.4. EQUIPOS DEL MOTOR
3. CUADROS DE PRECIOS UNITARIOS
4. ESTADO DE MEDICIONES Y PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN DE MATERIAL
5. PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN

1. INTRODUCCIÓN

El presente documento se trata de una parte fundamental del estudio, en la que se pretende realizar una evaluación económica del proyecto total. Para ello, se atenderá a los recursos empleados en cada una de las partes que han comprendido este trabajo, tanto a su precio como a la cantidad de este utilizada.

Todo este capítulo presupuestario se encuentra dividido en una serie de partes. Primero, se detallarán todos los distintos recursos empleados con su precio y la procedencia/explicación de este último. Tras ello, se detallarán cada una de las unidades de obra de las que se compone el trabajo con su correspondiente cuadro de precios unitarios. A esto le seguirá una muestra de las cantidades empleadas en cada unidad de obra junto con el presupuesto de ejecución de material para, finalmente, terminar con el presupuesto base de licitación.

2. CUADROS DE PRECIOS BÁSICOS

En este primer punto, se va a evaluar el precio de cada uno de los recursos empleados diferenciándolos según su naturaleza. Se atenderá para ello a información obtenida del departamento CMT-Motores Térmicos de la UPV, así como otras fuentes, para obtener una aproximación lo más correcta de estos precios.

2.1. Mano de obra

La mano de obra se refiere al personal que ha colaborado en el presente trabajo. Se va a evaluar el precio de estos por hora trabajada teniendo en cuenta una serie de consideraciones. Hay cuatro tipos de personal que se va a examinar, de los cuales, para las diferentes partes, sólo se ha empleado una unidad de ellos:

- Doctor (Tutor): Se consideran, según convenios, un salario bruto anual de este tipo de personal de 50.000€, un coste adicional de la empresa de un 30% en cuestión de seguridad social, accidentes o desempleos y 45 semanas laborables al año (las 52 totales menos 4 de vacaciones y 3 por festivos) a razón de 37.5 horas semanales.
- Doctorando: Se considera un salario bruto mensual de 1.100€ que puede recibir este tipo de personal con una beca FPU (Formación de Profesorado Universitario) del MEC (Ministerio de Educación y Cultura). En este caso, se tiene, además, en cuenta, el 30% de coste adicional de la empresa anteriormente explicado y 4 semanas laborables al mes a 37,5 horas semanales.
- Técnico de laboratorio: En este caso se asumirá un salario bruto anual de 25.000€ en igualdad de condiciones (costes adicionales de la empresa y horas trabajadas) al doctor.
- Estudiante: Para este se considera un contrato de prácticas a razón de 645€ mensuales brutos con las demás consideraciones iguales a las del doctorando.

En la siguiente tabla (P1) se muestra el cuadro de precios básicos, resultado de las anteriores consideraciones, correspondiente a la mano de obra.

Tabla P1. Cuadro de precios básicos de la mano de obra.

Código	Unidad	Descripción	Precio (€/h)
MO1	h	Doctor (Tutor)	38.52
MO2	h	Doctorando	9.53
MO3	h	Técnico de laboratorio	19.26
MO4	h	Estudiante	5.59

2.2. Materiales informáticos

En este punto se tienen en cuenta los ordenadores/portátiles empleados, así como las licencias a los distintos software necesarios para llevar a cabo el proyecto. Para el cálculo del precio por hora de los primeros se ha considerado su amortización a lo largo de su vida útil utilizando las siguientes ecuaciones:

$$Amortización = \frac{Precio\ compra - Valor\ residual}{Años} \quad (P2.2.1)$$

$$Precio = \frac{Amortización + Mantenimiento}{Horas\ anuales\ trabajadas} \quad (P2.2.2)$$

Se han estimado 1687,5 horas anuales trabajadas (45 semanas laborables a razón de 37,5 horas semanales como se ha explicado en el punto anterior), obteniendo la siguiente tabla (P2) como resultado.

Tabla P2. Amortización equipos informáticos.

Descripción	Precio compra (€)	Valor residual (€)	Años	Amortización (€/año)	Mantenimiento (€/año)	Precio (€/h)
Portátil particular	700.00	0.00	5	140.00	0.00	0.08
Torre de cálculo	7000.00	0.00	6	1166.67	0.00	0.69
PC de control experimental	1000.00	0.00	4	250.00	0.00	0.15

En cuanto a las licencias de software, se ha tenido en cuenta un coste anual para acabar estimando de igual forma, conociendo las horas trabajadas anuales, su precio por hora. Este coste se ha estimado en 10,000€, 800€ y 100€ para GT-SUITE, Matlab y Microsoft Office, respectivamente, obteniendo en la siguiente tabla (P3) el cuadro básico de precios de los materiales informáticos.

Tabla P3. Cuadro de precios básicos de los materiales informáticos.

Código	Unidad	Descripción	Precio (€/h)
MAI1	h	Portátil particular	0.08
MAI2	h	Torre de cálculo	0.69
MAI3	h	PC de control experimental	0.15
MAI4	h	Licencia GT-SUITE	5.93
MAI5	h	Licencia Matlab	0.47
MAI6	h	Licencia Microsoft Office	0.06

2.3. Material fungible

Se trata de aquel material que se consume completamente durante el proyecto y cuyo cuadro de precios básicos se ve a continuación (Tabla P4).

Tabla P4. Cuadro de precios básicos del material fungible.

Código	Unidad	Descripción	Precio (€/l)
MAF1	l	Gasolina	1.30
MAF2	l	Aceite	7.25

2.4. Equipos del motor

Por equipos del motor se habla de toda la instalación experimental junto con todos los dispositivos necesarios para la toma de medidas. En este caso se ha seguido un procedimiento de cálculo de amortizaciones de igual forma al material informático. A continuación se presentan la tabla P5 y P6 con la información correspondiente a estos recursos.

Tabla P5. Amortización equipos del motor.

Descripción	Precio compra (€)	Valor residual (€)	Años	Amortización (€/año)	Mantenimiento (€/año)	Precio (€/h)
Sistema de admisión	95000.00	0.00	10	9500.00	4500.00	8.30
Sistema de escape	4000.00	0.00	10	400.00	200.00	0.36
Sistema de refrigeración y lubricación	10000.00	0.00	10	1000.00	500.00	0.89
Sistema de combustible	11500.00	0.00	10	1150.00	550.00	1.01
Precámara	500.00	0.00	3	166.67	0.00	0.10
Analizador de gases, HORIBA MEXA 7100 DEGR	120000.00	0.00	10	12000.00	6000.00	10.67
Medidor de humos, AVL 415	15000.00	0.00	10	1500.00	700.00	1.30
Acondicionador, AVL 577	1000.00	0.00	2	500.00	0.00	0.30
Medidor de combustible, AVL 733	600.00	0.00	2	300.00	0.00	0.18
Acondicionador combustible, AVL 753	450.00	0.00	2	225.00	0.00	0.13
Blow-by AVL 442	9300.00	0.00	10	930.00	450.00	0.82
Codificador angular AVL 364	4500.00	0.00	10	450.00	200.00	0.39
Sistema de adquisición de datos AVL	155000.00	0.00	10	15500.00	7800.00	13.81
Sensores de presión media	1500.00	0.00	1	1500.00	0.00	0.89
Sensores de presión instantánea	18000.00	0.00	1	18000.00	0.00	10.67
Osciloscopio	10500.00	0.00	5	2100.00	500.00	1.54
Multímetro	45.00	0.00	4	11.25	0.00	0.01
Sonda lambda	150.00	0.00	1	150.00	0.00	0.09
Termopares	900.00	0.00	1	900.00	0.00	0.53
Freno dinamométrico	102000.00	0.00	10	10200.00	5000.00	9.01
Torquímetro	37500.00	0.00	10	3750.00	1800.00	3.29
Pinza amperimétrica	650.00	0.00	10	65.00	0.00	0.04
Sincronizador	425.00	0.00	4	106.25	0.00	0.06
Clusters de alto rendimiento	250000.00	0.00	10	25000.00	7000.00	18.96
Indimicro	35000.00	0.00	4	8750.00	1500.00	6.07
Unidad PUMA	17000.00	0.00	4	4250.00	700.00	2.93
Instalaciones básicas	100000.00	0.00	30	3333.33	5000.00	4.94

Tabla P6. Cuadro de precios básicos de equipos del motor.

Código	Unidad	Descripción	Precio (€/h)
MAE1	h	Sistema de admisión	8.30
MAE2	h	Sistema de escape	0.36
MAE3	h	Sistema de refrigeración y lubricación	0.89
MAE4	h	Sistema de combustible	1.01
MAE5	h	Precámara	0.10
MAE6	h	Analizador de gases, HORIBA MEXA 7100 DEGR	10.67
MAE7	h	Medidor de humos, AVL 415	1.30
MAE8	h	Acondicionador, AVL 577	0.30
MAE9	h	Medidor de combustible, AVL 733	0.18
MAE10	h	Acondicionador combustible, AVL 753	0.13
MAE11	h	Blow-by AVL 442	0.82
MAE12	h	Codificador angular AVL 364	0.39
MAE13	h	Sistema de adquisición de datos AVL	13.81
MAE14	h	Sensores de presión media	0.89
MAE15	h	Sensores de presión instantánea	10.67
MAE16	h	Osciloscopio	1.54
MAE17	h	Multímetro	0.01
MAE18	h	Sonda lambda	0.09
MAE19	h	Termopares	0.53
MAE20	h	Freno dinamométrico	9.01
MAE21	h	Torquímetro	3.29
MAE22	h	Pinza amperimétrica	0.04
MAE23	h	Sincronizador	0.06
MAE24	h	Clusters de alto rendimiento	18.96
MAE25	h	Indimicro	6.07
MAE26	h	Unidad PUMA	2.93
MAE27	h	Instalaciones básicas	4.94

3. CUADROS DE PRECIOS UNITARIOS

En este momento, se va a dividir el proyecto en cinco unidades de obras que se van a presentar a continuación con sus cuadros de precios unitarios (Tablas P7 a P11). Estas se corresponden a diferentes fases a lo largo del estudio completo. Se adjudicará a cada fase los recursos empleados más un porcentaje de costes directos complementarios de un 5%, quedando todo en función a las horas empleadas en cada fase que se definirán en el estado de mediciones posterior.

Tabla P7. Planteamiento del proyecto.

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio (€/h)	Importe (€)
MO1	h	Doctor (Tutor)	1	38.52	38.52
MO2	h	Doctorando	1	9.53	9.53
MO3	h	Estudiante	1	5.59	5.59
MAI1	h	Portátil particular	1	0.08	0.08
CDC	%	Costes Directos Complementarios	0.05	53.72	2.69

Total por h..... **56.41 €**

Tabla P8. Adquisición de conocimientos en GT-POWER.

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio (€/h)	Importe (€)
MO2	h	Doctorando	0.5	9.53	4.77
MO3	h	Estudiante	1	5.59	5.59
MAI1	h	Portátil particular	1	0.08	0.08
MA12	h	Torre de cálculo	1	0.69	0.69
MAI4	h	Licencia GT-SUITE	0.75	5.93	4.44
MAI5	h	Licencia Matlab	0.75	0.47	0.36
CDC	%	Costes Directos Complementarios	0.05	15.93	0.80

Total por h..... **16.73 €**

Tabla P9. Simulaciones experimentales para la calibración de modelos.

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio (€/h)	Importe (€)
MO3	h	Técnico de laboratorio	1	19.26	19.26
MO4	h	Estudiante	1	5.59	5.59
MAI3	h	PC de control experimental	1	0.15	0.15
MAET	h	Instalaciones experimentales totales	1	97.27	97.27
MAF1	l	Gasolina	3	1.30	3.90
MAF2	l	Aceite	0.1	7.25	0.73
CDC	%	Costes Directos Complementarios	0.05	126.89	6.34

Total por h..... **133.23 €**

**El precio de las instalaciones experimentales se ha obtenido como suma de los precios parciales de la tabla P6.

Tabla P10. Simulaciones realizadas en GT-POWER para la parte de resultados.

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio (€/h)	Importe (€)
MO1	h	Doctor (Tutor)	0.5	38.52	19.26
MO2	h	Doctorando	0.5	9.53	4.77
MO3	h	Estudiante	1	5.59	5.59
MAI1	h	Portátil particular	1	0.08	0.08
MAI2	h	Torre de cálculo	1	0.69	0.69
MAI4	h	Licencia GT-SUITE	1	5.93	5.93
MAI5	h	Licencia Matlab	1	0.47	0.47
CDC	%	Costes Directos Complementarios	0.05	36.79	1.84

Total por h..... **38.63 €**

Tabla P11. Revisión bibliográfica y escrito final del documento.

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio (€/h)	Importe (€)
MO1	h	Doctor (Tutor)	0.5	38.52	19.26
MO2	h	Doctorando	0.5	9.53	4.77
MO3	h	Estudiante	1	5.59	5.59
MAI1	h	Portátil particular	1	0.08	0.08
MAI6	h	Licencia Microsoft Office	1	0.06	0.06
CDC	%	Costes Directos Complementarios	0.05	29.76	1.49

Total por hora..... **31.25 €**

4. ESTADO DE MEDICIONES Y PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN DE MATERIAL

En el presente apartado se ha estimado el tiempo requerido para cada unidad de obra y así poder llevar a cabo el presupuesto de ejecución de material. Para este último se han tenido en cuenta unos costes indirectos de un 4%. Todo ello se encuentra recogido en la siguiente tabla (P12).

Tabla P12. Estado de mediciones y Presupuesto de Ejecución de Material (PEM).

Códi- go	U	Descripción	Med (h)	Precio (€/h)	Importe (€)
U01	h	Planteamiento del proyecto	50	56.41	2820.55
CI	%	Costes Indirectos	0.04	2820.55	112.82
U02	h	Adquisición de conocimientos	50	16.73	836.38
CI	%	Costes Indirectos	0.04	836.38	33.46
		Simulaciones experimentales para la calibración de modelos			
U03	h		125	133.23	16654.19
CI	%	Costes Indirectos	0.04	16654.19	666.17
		Simulaciones realizadas en GT-POWER para la parte de resultados			
U04	h		75	38.63	2897.23
CI	%	Costes Indirectos	0.04	2897.23	115.89
U05	h	Revisión bibliográfica y escrito del documento final	200	31.25	6249.21
CI	%	Costes Indirectos	0.04	6249.21	249.97

PEM..... 30,635.87€

5. PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN

Finalmente se han considerado unos gastos generales de un 13% y un beneficio industrial de un 6%, generando, a partir de ellos, el presupuesto de ejecución por contrata. Para obtener el presupuesto base de licitación se ha valorado el IVA en un 21%. La siguiente tabla (P13) recoge el proceso anterior.

Tabla P13. Presupuesto Base de Licitación.

Presupuesto de Ejecución de Material	30,635.87 €
Gastos Generales (13%)	3,982.66 €
Beneficio Industrial (6%)	1,838.15 €
Presupuesto de Ejecución por Contrata	36,456.68 €
IVA (21%)	7,655.90 €
Presupuesto Base de Licitación	44,112.58 €

El presupuesto total de ejecución del proyecto asciende a cuarenta y cuatro mil ciento doce euros con cincuenta y ocho céntimos.