



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

ESTUDIO DE LA COMBUSTIÓN EN UN MOTOR DE CARGA HOMOGÉNEA CON ENCENDIDO POR COMPRESIÓN

AUTOR: SERGIO FRUTOS PINÉS

TUTOR: FERRAN NAYA SANCHÍS

Curso Académico: 2017-18

*“El que quiere algo conseguirá un medio,
el que no, una excusa”*
Stephen Dolley

Resumen

Aunque los coches híbridos y eléctricos parece que representan el futuro, actualmente algunos fabricantes de automóviles siguen desarrollando motores de combustión interna alternativo como es el motor de carga homogénea con encendido por compresión (Homogeneous Charge Compression Ignition, HCCI). El interés del desarrollo de este tipo de motores radica en conseguir menores emisiones contaminantes y menores consumos que los motores de combustión interna actuales, sin renunciar a los términos de potencia y eficiencia. En este contexto, en este trabajo se analiza mediante tecnologías de diseño y simulación actuales el proceso de combustión que tiene lugar en un motor con tecnología HCCI/SCCI (spark controlled compression ignition, SCCI) en condiciones de baja-media carga.

Palabras clave: CAE, motor combustión, HCCI, CFD.

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

Abstract

Although hybrid and electric cars seem to represent the future, some car manufacturers are now continuing to develop alternative internal combustion engines such as the Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) engine. The interest of the development of this type of engine lies in achieving lower pollutant emissions and lower consumption than current internal combustion engines, without renouncing the terms of power and efficiency. In this context, this paper analyses, using current design and simulation technologies, the combustion process that takes place in an engine with HCCI/SCCI (spark-controlled compression ignition, SCCI) technology under low to medium load conditions.

Keywords: CAE, combustion engine, HCCI, CFD.

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

Resum

Encara que els cotxes híbrids i elèctrics pareix que representen el futur, actualment alguns fabricants d'automòbils continuen desenvolupant motors de combustió interna alternatiu com és el motor de càrrega homogènia amb encesa per compressió (Homogeneous Charge Compression Ignition, HCCI). L'interès del desenvolupament d'aquest tipus de motors radica a aconseguir menors emissions contaminants i menors consums que els motors de combustió interna actuals, sense renunciar als termes de potència i eficiència. En aquest context, en este treball s'analitza per mitjà de tecnologies de disseny i simulació actuals el procés de combustió que té lloc en un motor amb tecnologia HCCI/SCCI (spark controlled compression ignition, SCCI) en condicions de baixa-mitja càrrega.

Paraules clau: CAU, motor combustió, HCCI, CFD.

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

ÍNDICE DE DOCUMENTOS

- **Documento I: Memoria**
- **Documento II: Presupuestos**
- **Documento III: Planos**

Índice de la Memoria

1. Objetivo y justificación del trabajo realizado.....	1
1.1. Objetivo.....	1
1.2. Justificación y motivación.....	1
2. Soluciones actuales al problema de las emisiones contaminantes.....	2
2.1. Introducción.....	2
2.2. Normativas europeas para la restricción de emisiones contaminantes.....	2
2.3. Motores híbridos y eléctricos.....	5
2.4. Tecnologías de reducción de emisiones.....	8
2.5. Ventajas e inconvenientes de los motores HCCI.....	11
2.6. Conclusiones.....	14
3. Motores HCCI.....	15
3.1. Funcionamiento.....	15
3.2. Control de emisiones contaminantes.....	18
3.3. Estudios en motores HCCI.....	20
3.3.1. Principales combustibles para motores HCCI.....	22
3.4. Conclusiones.....	24
4. Datos experimentales y programas utilizados para la simulación.....	25
4.1. Introducción.....	25
4.2. Motor base de estudio.....	26
4.2.1. Parámetros del motor base de estudio.....	26
4.3. Programas utilizados para la simulación.....	29
4.3.1. Inventor.....	29
4.3.2. ANSYS CFX.....	30
4.4. Conclusiones.....	40
5. Simulación CFD y resultados.....	41
5.1. Descripción de la simulación realizada.....	41
5.1.1. Modelos utilizados.....	42
5.1.2. Simplificaciones consideradas.....	43
5.1.3. Condiciones de contorno de la simulación CFD.....	44
5.1.4. Simulaciones realizadas.....	45
5.2. Resultados.....	47
5.2.1. Datos de emisiones para validación.....	47

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

5.2.2. Análisis y validación de resultados.....	49
5.3. Observaciones finales.....	57
6. Conclusiones y expectativas de futuro	59
7. Bibliografía	60
Referencias	60
Trabajos citados	61

Índice del presupuesto

1. Descripción de los presupuestos	65
1.1. Unidades de obra	65
1.2. Calculo del precio de los materiales y herramientas empleadas.....	66
2. Presupuesto del trabajo	67
2.1. Cuadros de precios del trabajo	67
2.2. Presupuesto general del trabajo	70

Índice de planos

Cilindro	74
Cámara de combustión	75
Colectores	76
Colector de admisión	76
Colector de escape	77
Válvulas	78
Válvula de admisión	78
Válvula de escape	79
Pistón	80
Conjunto Motor	81

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

Documento I

MEMORIA

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

1. Objetivo y justificación del trabajo realizado

1.1. Objetivo

El objetivo que se persigue con este trabajo de fin de grado es analizar las características que definen a los motores con tecnología HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition), así como sus ventajas y limitaciones en cuanto a la producción de emisiones y el proceso de combustión que lo caracteriza.

1.2. Justificación y motivación

El estudio de este tipo de motores (HCCI) surge de la necesidad cada vez más creciente de reducir las emisiones contaminantes producidas por los automóviles y en como estos motores constituyen una prometedora alternativa de solución a este problema. Es por ello, que en este trabajo de fin de grado se pretende analizar a los motores HCCI, cuya principal ventaja son los reducidos valores de emisiones que generan, factor el cual supone el principal motivo por el que algunas marcas de automóviles estén intentando introducir esta tecnología en el mercado.

Por ello, la motivación principal que ha llevado a la realización de este trabajo de fin de grado es, por una parte, el estudio de la importancia de la reducción emisiones en el mercado del automóvil y como este factor ha llevado a los ingenieros ocupados en el mundo del motor a investigar nuevos métodos de control de emisiones, nuevas formas de energía alternativas para abastecer los automóviles o la implementación de “innovadores” (el modo de combustión HCCI no es nuevo) procesos de combustión y, por otra parte, entender como es el funcionamiento de un motor con este tipo de sistema.

2. Soluciones actuales al problema de las emisiones contaminantes

2.1. Introducción

Para conseguir el objetivo propuesto es necesario entender cómo han evolucionado en los últimos años las normativas anticontaminantes y con ellas el mercado del automóvil y con ello las soluciones actuales al problema de las emisiones contaminantes. Así, la reducción de emisiones supone actualmente una de las preocupaciones más importantes en el mercado automovilístico, de tal forma que, actualmente se desarrollan diversos tipos de soluciones con el objetivo de reducir las emisiones producidas manteniendo la eficiencia y rendimiento de los motores actuales.

2.2. Normativas europeas para la restricción de emisiones contaminantes

Uno de los problemas más importantes a nivel global es el de la contaminación del medio ambiente por la emisión de gases nocivos de efecto invernadero como el CO₂. Así, aunque no se trate del principal productor de este tipo de gases, el sector del transporte (tal y como se observa en la **Figura 1**) es uno de los mayores productores de gases de efecto invernadero (GEI) como son el CO₂, CO o NO_x entre otros. Por esta razón, a lo largo de los años la normativa anticontaminación para los vehículos se ha vuelto más estricta, llegando actualmente hasta la normativa EURO 6.

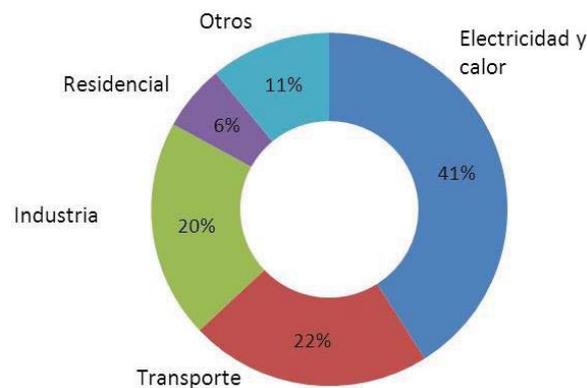


Figura 1 Contribución de cada sector a la emisión de CO₂.

Fuente: www.naukas.com

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

Las normativas impuestas han ido evolucionando desde 1988 con la normativa Euro 0 hasta la actualidad con la normativa Euro 6 para turismos o Euro VI para vehículos pesados. A partir del establecimiento de la norma Euro 0 los vehículos vendidos en Europa están obligados a cumplir una serie de estrictos valores de emisiones producidas. Estas normativas han limitado principalmente cuatro emisiones potencialmente peligrosas para la salud humana y el medio ambiente como son los óxidos de nitrógeno (NO_x), el monóxido de carbono (CO), hidrocarburos sin quemar (HC) y el hollín (Shoot).

Las diferencias entre la normativa Euro 5 y la vigente normativa Euro 6, entre las cuales existe un periodo temporal de 5 años, ayudan a entender cómo de drásticas están siendo estas medidas. Así en la normativa Euro 6 se impone, para motores Diésel, que las emisiones de NO_x deben ser de como máximo 80 mg/Km, una reducción fuerte frente a los 180 mg/Km impuestos en la Euro 5. En lo que respecta a otra de las sustancias contaminantes más controladas como son las PM (Partículas en suspensión), la normativa limita sus emisiones a 5 mg/Km, y por último en la normativa Euro 6 el límite de emisiones de HC y NO_x juntos es de 170 mg/Km frente a los 230 mg/Km de la normativa Euro 5 y las emisiones de CO a 500 mg/Km. Por otro lado, para motores gasolina, la normativa Euro 6 limita las emisiones de NO_x a 60 mg/Km, las de CO a 1000 mg/Km y las de HC junto con NO_x a 160 mg/Km.

De forma gráfica, se puede observar en la **Figura 2** como han evolucionado las restricciones anticontaminantes a medida que se han implantado nuevas normativas:

Tipo	Fecha	CO	HC	HC+NO _x	NO _x	PM (ppm)
Diésel						
Euro I	Julio de 1992	2,72 (3,16)	-	0,97 (1,13)	-	0,14 (0,18)
Euro II	Enero de 1996	1,0	-	0,7	-	0,08
Euro III	Enero de 2000	0,64	-	0,56	0,50	0,05
Euro IV	Enero de 2005	0,50	-	0,30	0,25	0,025
Euro V	Septiembre de 2009	0,50	-	0,23	0,18	0,005
Euro VI	Septiembre de 2014	0,50	-	0,17	0,08	0,005
Gasolina						
Euro I	Julio de 1992	2,72 (3,16)	-	0,97 (1,13)	-	-
Euro II	Enero de 1996	2,2	-	0,5	-	-
Euro III	Enero de 2000	2,30	0,20	-	0,15	-
Euro IV	Enero de 2005	1,0	0,10	-	0,08	-
Euro V	Septiembre de 2009	1,0	0,10	-	0,06	0,005 ^b
Euro VI	Septiembre de 2014	1,0	0,10	-	0,06	0,005

* Antes de Euro V turismos > 2500 kg estaban clasificados en la categoría Vehículo industrial ligero N1 - I
Tabla en g/km salvo PM (partículas) en partes por millón (PPM)

Figura 2 Límites de emisiones por contaminante en la Unión Europea para cada normativa (g/Km).

Fuente: Revista CESVIMAP

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

En la actualidad, nos encontramos con la normativa vigente Euro 6b, no obstante, en septiembre se hará vigente la normativa Euro 6c y en el año 2019-2020 la Euro 6d. La diferencia de estas dos últimas normativas por surgir son en primer lugar, el cambio de tipo de test de homologación del NEDC (New European Driving Cycle), que es la forma en que se reproduce el funcionamiento de un motor en carretera a la vez que se controlan las emisiones, al WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedures) donde se determinarán los límites de las emisiones contaminantes y de CO₂, así como del consumo de combustible y la autonomía, en el caso de los vehículos eléctricos. Y, en segundo lugar, en la forma de limitar la producción de partículas, ya que la limitación se volverá más severa para motores gasolina haciendo que sea necesario implantar en ellos un filtro de partículas como se lleva a cabo ya en los Diesel.

Todas las normativas aplicadas han afectado sobretodo a la producción de los motores Diesel, los cuales se encuentran actualmente en un periodo de incertidumbre respecto a su desaparición en los próximos años o no. Así, según un estudio llevado a cabo por la productora y distribuidora de Adblue4you en Europa GreenChem denominado el "*Libro Verde del diésel*", los motores diésel fabricados desde septiembre de 2014 emiten un 30 % menos de dióxido de carbono (CO₂) y un 85 % menos de óxidos de nitrógeno (NO_x) que los que circulaban hace una década, lo cual hace ver que la aparición de normativas cada vez más estrictas han hecho que estos motores sean mucho menos contaminantes en solo 10 años.

En este estudio se indica también que a partir de septiembre de 2019 no se podrán matricular vehículos diésel nuevos que emitan más de 168 mg/km de NO_x, ya que será en ese año cuando entre en vigor la norma Euro 6d para nuevos modelos.

Por tanto, se observa como el avance en las normativas ha llevado consigo un aumento de las limitaciones impuestas a las emisiones, que ha llevado a los fabricantes de automóviles a desarrollar nuevos métodos de reducción de emisiones usando nuevas tecnologías o a la cada vez más importante presencia en el mundo automovilístico de los coches híbridos y eléctricos.

2.3. Motores híbridos y eléctricos

En la actualidad, el mercado automovilístico está enfocándose de forma creciente a la producción y venta de coches eléctricos e híbridos. Esto se demuestra al observar como en el 2018 en España, según un estudio expuesto por el diario ABC, el porcentaje de vehículos eléctricos e híbridos vendidos sobre el total de matriculaciones ha sido del 5,07%, alcanzando una mayor cuota de mercado en el mes de abril de este año donde se produjeron 6816 matriculaciones, es decir, se ha producido un crecimiento del 67,8% respecto al mismo periodo del año 2017. Este crecimiento del mercado de coches eléctricos e híbridos no bastante, es menor que el crecimiento actual del mercado de motores térmicos actual según datos aportados por la Asociación Nacional de Importadores de Automóviles, Camiones, Autobuses y Motocicletas (ANIACAM), donde se indica que las matriculaciones de coches de gasolina en el mes de abril del año 2018 crecieron en un 39,53% respecto al año 2017 y que las matriculaciones de los Diesel aunque cayeron en un 17,31% respecto al año 2017, siguen siendo mayores que las de coches eléctricos o híbridos.

Estos datos nos ofrecen una visión actual de como en el mercado la tendencia es creciente (aunque en menor medida todavía que para los motores térmicos) en cuanto a las ventas de coches eléctricos e híbridos mientras que las de los Diesel es, actualmente decreciente. Cada indicar, que este año el periodo de mayor crecimiento en ventas de coches eléctricos e híbridos fue en el primer cuatrimestre donde se produjeron 26.265 matriculaciones, consiguiendo un crecimiento del 45,7% respecto al mismo periodo del año anterior.

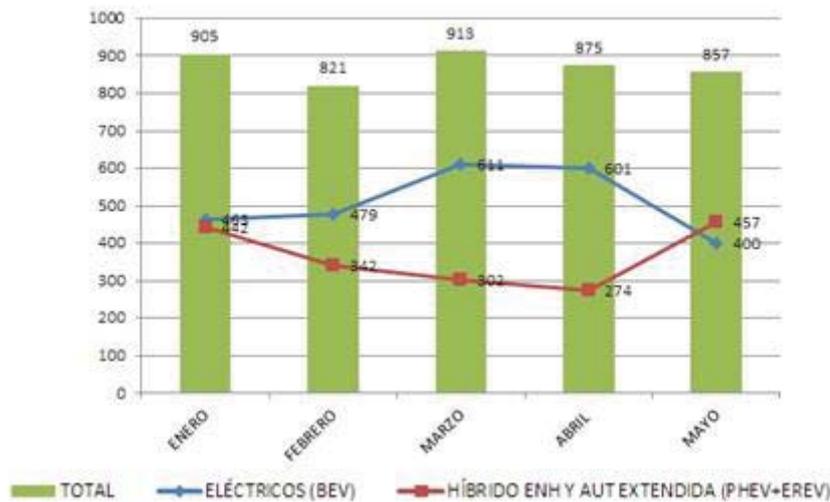
De esta forma, por una parte, en el mercado de coches eléctricos el crecimiento en el mes de abril de este año fue de 122,8 % respecto al año anterior consiguiendo de esta forma 869 matriculaciones, y se consiguió un crecimiento en ventas del 119,9% en el primer cuatrimestre respecto al mismo periodo del año 2017. Si se lleva a cabo un estudio más profundo, se observa que, en cuanto a provincias, en Madrid y Barcelona es donde más coches eléctricos se han vendido, consiguiendo de esta forma 1.365 matriculaciones en Madrid y 487 matriculaciones en Barcelona (un 48,77% y un 17,36% del total de coches eléctricos vendidos en España).

Por su parte, la venta y producción de coches híbridos también ha crecido en España en el año actual alcanzándose 22.695 matriculaciones en el primer cuatrimestre de este año, es decir, un crecimiento del 38,4% respecto al año 2017.

A modo de representación gráfica, se expone a continuación la gráfica de crecimiento de las ventas de coches eléctricos (BEV) y las de híbridos enchufables (PHEV) junto con híbridos convencionales (EREV). Cabe decir, que los híbridos enchufables son idénticos a los híbridos convencionales, únicamente les diferencia que los híbridos enchufables recargan sus baterías enchufando el coche a un punto de recarga, mientras que los híbridos convencionales las recargan mediante sistemas de recuperación de energía durante la frenada.

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

Resumen de ventas vehículos eléctricos 2018 (BEV/PHEV+EREV/TOTALES)



Gráfica 1 Ventas de coches eléctricos, híbridos enchufables y eléctricos de autonomía extendida en España hasta el mes de mayo de 2018.

Fuente: www.movilidadelectrica.com

En cuanto a marcas, si consultamos datos del ANFAC (Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones), se observa como el año 2017 la marca líder en ventas de coches híbridos fue Toyota, mientras el mercado de coches eléctricos es más heterogéneo y en este caso el motor eléctrico más vendido en el 2017 fue de Renault:

Motores híbridos		Motores eléctricos	
Marca	Unidades	Marca	Unidades
1.-Toyota Auris	6.050	1.- Renault Zoe	337
2.- Toyota C-HR	5.961	2.- Nissan Leaf	278
3.- Toyota Rav4	33.842	3.- BMW i3	218
4.- Toyota Yaris	3.797	4.- Nissan NV 200	132
5.-Kia Niro	2.035	5.- Renault Kangoo	123

Tabla 1 Clasificación de motores híbridos y eléctricos más vendidos en 2017.

Fuente: ANFAC

Por otra parte, en el mundo se espera, según un informe realizado por el Centro de Investigación de Energía Solar e Hidrógeno de Baden-Württemberg (ZSW), que para el año 2025 existan en circulación 25 millones de coches eléctricos, siendo China quien lidere el mercado. Así, el mismo estudio se basa en los datos obtenidos hasta este 2018 donde China lidera el mercado de coches eléctricos con alrededor de 1,2 millones de ventas (casi el doble que en el año 2016). Estados unidos se coloca en segunda posición con 751.510 coches eléctricos vendidos entre 2017 y 2018 y Japón se coloca tercera con 201.410 automóviles eléctricos vendidos en el mismo periodo.

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

Todos estos datos, junto con la cada vez más cercana desaparición de los motores diésel como consecuencia de las estrictas normativas anticontaminantes impuestas hacen que se contemple un futuro mercado caracterizado por la desaparición continuada de los motores térmicos y el paso adelante de los motores híbridos y eléctricos.

No obstante, este tipo de automóviles no dejan de tener inconvenientes asociados tanto a la producción de emisiones contaminantes, en tanto que la electricidad producida para alimentar tal cantidad de coches eléctricos e híbridos actualmente puede ser eficientemente abastecida por centrales térmicas de carbón o gas natural que llegan a producir más emisiones que los propios automóviles con motores térmicos, como por la poca autonomía que presentan aún los motores eléctricos en comparación a los térmicos. Así, los motores eléctricos, aunque si bien presentan altos niveles de eficiencia energética y rendimiento, también presentan poca autonomía y la red de recarga hoy en día sigue siendo insuficiente.

Respecto a los motores híbridos, sus principales ventajas son la capacidad de funcionar una parte del tiempo con un motor eléctrico que en muchos automóviles se recarga automáticamente él solo, lo cual es posible gracias al denominado KERS, una tecnología que permite aprovechar la energía cinética del coche en las frenadas. Todo ello supone también que el motor térmico funciona durante menor tiempo, por lo que contamina y consume menos. No obstante, estos motores son actualmente demasiado caros en comparación a los térmicos convencionales, y aunque contaminan menos, siguen teniendo el problema de las emisiones.

Es por estas razones por las que actualmente se siguen desarrollando tecnologías para la reducción de emisiones contaminantes, de forma que los motores térmicos puedan seguir siendo una alternativa de presente y futuro.

2.4. Tecnologías de reducción de emisiones

Otra de las soluciones para la reducción de las emisiones contaminantes es el uso de tecnologías de reducción de estas. En la actualidad el control de las emisiones contaminantes producidas por los motores térmicos de automóviles es cada vez más exhaustivo debido a la serie de normativas contra emisiones que han surgido y que han provocado que los motores MCI hayan evolucionado aumentando su rendimiento y eficiencia y añadiendo nuevos dispositivos y tecnologías de reducción de emisiones para poder seguir siendo utilizados.

De esta manera, con el objetivo de reducir las emisiones y cumplir con las normativas los fabricantes de los principales motores térmicos (MEP y MEC) han desarrollado diferentes metodologías que se describen seguidamente:

- **Motores gasolina:**

En este tipo de motores la combustión es de tipo localizada y premezclada, de forma que la combustión se inicia debido a una chispa que origina un frente de llama que se desplaza quemando la mezcla (homogénea) de aire y combustible.

Según el dosado de la mezcla, se pueden distinguir los que trabajan siempre con mezcla estequiométrica ($Fr=1$) y los que lo pueden hacer también con mezcla pobre ($Fr<1$). De esta forma, en funcionamiento con mezcla estequiométrica se usa una válvula de mariposa para regular la carga (aire que entra por el colector de admisión), lo cual produce elevadas pérdidas por trabajo de bombeo sobretodo a baja carga debido al estrangulamiento producido que disminuye el rendimiento del motor. Así, la mezcla de aire y gasolina se mantiene casi constante en proporción estequiométrica en las diferentes condiciones de régimen y carga del motor. Por otra parte, el funcionamiento con mezcla pobre se encuentra en motores de inyección directa donde el modelo de combustión se basa en conseguir la mayor cantidad de mezcla posible alrededor de la bujía de forma que tengamos una mezcla muy rica en torno a la bujía (elevada producción de NO_x) y muy pobre en el resto de la cámara de combustión. El principal problema de los motores gasolina es la aparición de combustión detonante en zonas en las que se alcancen unos picos de presión y temperatura demasiado elevados.

Respecto a sus emisiones, en los motores gasolina las más importantes son las de CO_2 , CO y NO_x , las cuales están fuertemente limitadas por la normativa Euro, además de las emisiones de HC y de las partículas en suspensión. Así, de los gases de escape, alrededor de un 18,1% son emisiones de CO_2 , mientras que un 1,7% de esos gases representan al resto de emisiones contaminantes como CO (0,85%), NO_x (0,08%) o HC (0,05%).

Para reducir estos valores de emisiones se llevan a cabo dos tipos de soluciones:

- Soluciones activas basadas en evitar la formación de los contaminantes. Este tipo de soluciones son la utilización de inyección directa junto con el control electrónico del dosado y un rediseño de las cámaras de combustión para reducir HC y CO , y la utilización de EGR (Recirculación de gases de escape para reducir las temperaturas de combustión y con ello los NO_x emitidos).

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

- Soluciones pasivas basadas en eliminar los contaminantes ya producidos. Serían soluciones pasivas el uso de catalizadores de tres vías (totalmente extendidos y generalizados en este tipo de automóviles), las trampas de NO_x para cuando el motor funciona en condiciones pobres y el uso de sistemas de retención de vapores (HC) en el cárter y el depósito de combustible.

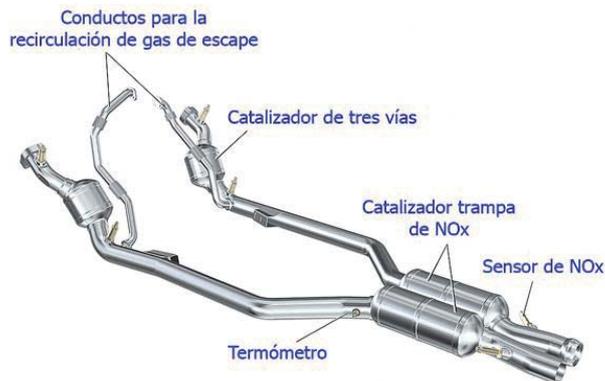


Figura 3 Trampa de NO_x y catalizador de 3 vías.

Fuente: <http://www.mbfaq.com>

- **Motores Diesel:**

En este tipo de motores la combustión es de tipo localizada por difusión y de inyección directa, de forma que por el colector de admisión solo entra aire y el combustible se inyecta después mediante un inyector situado cerca del punto muerto superior. En estos motores la carga se varía mediante el inyector modificando la cantidad de gasóleo inyectado.

En estos motores, se alcanzan altas temperaturas de combustión en las zonas donde la mezcla es más rica, lo que provoca las altas emisiones contaminantes de NO_x y hollín¹ e hidrocarburos que no han sido quemados. Por tanto, en los motores Diésel las emisiones más importantes son las de hollín y NO_x, mientras que en un segundo plano se encuentran las emisiones de CO y HC. Así, las emisiones de los gases de escape están compuestas en estos motores por alrededor de un 11,6% de emisiones de CO₂ y un 0,25% de otras emisiones contaminantes como NO_x (0,22% del total de otras emisiones contaminantes), PM (0,025% del total de otras emisiones contaminantes) o CO y HC (0,005% y 0,003% del total de otras emisiones contaminantes).

De esta manera, como ya se ha explicado los motores MEC están siendo los más afectados por la aparición de las normativas europeas, y es que se están viendo muy limitados en cuanto a la utilización de nuevos dispositivos que sean capaces de hacer que estos motores cumplan con las normativas.

¹ Partículas formadas únicamente en las combustiones por difusión y que provienen de parte del carbono producido en la deshidrogenación del combustible durante la combustión.

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

- Las soluciones activas utilizadas en estos motores son la utilización de EGR, la modificación del sistema de inyección (quedando descartada totalmente desde hace años el uso de inyección indirecta y utilizando conceptos como las post-inyecciones) y la modificación de los procesos de combustión, usando combustiones de tipo LTC (Combustión por difusión a baja temperatura) o HCCI (tipo de combustión que se analiza en este trabajo de fin de grado).
- Como soluciones pasivas se utilizan catalizadores de oxidación (como variante del catalizador de tres vías utilizado en MEP), filtros de partículas y trampas de NO_x.



Figura 4 Filtro de partículas.
Fuente: www.elmundo.es

Dentro de las soluciones activas, destacan el uso de métodos de combustión diferentes como el LTC o el HCCI. El LCT es un modo de combustión por difusión a baja temperatura en el que destaca una fuerte reducción de la temperatura de llama que lleva consigo una reducción de las emisiones de NO_x y una fuerte reducción en las emisiones de partículas debido a una reducción del dosado al lift-off, aunque con este modo de combustión también se produce un aumento en las emisiones de CO y HC.

Por otra parte, el modo de combustión HCCI del que trata este trabajo final de grado, es una tecnología estudiada desde hace años con la que se consiguen emitir menos emisiones contaminantes que un motor de Diesel consumiendo a su vez menos que un motor gasolina. De esta forma, este tipo de modelo de combustión consigue mezclar las dos principales ventajas de los motores diésel y gasolina.

Estos factores, junto con las importantes limitaciones que presentan los motores híbridos y eléctricos, han hecho que algunas marcas como Mazda hayan decidido continuar la producción e investigación en motores MCI utilizando un tipo diferente de proceso de combustión (HCCI) que, como se ha dicho, complementa las ventajas de los motores Diésel y Gasolina reduciendo sus respectivos inconvenientes y permitiendo obtener motores de elevado rendimiento y eficiencia en consumo junto con reducidas emisiones contaminantes sin renunciar a elevadas potencias. Esto hace ver a este tipo de motor como una alternativa real tanto a los motores térmicos convencionales como a los eléctricos, o al menos como una forma de transición limpia y con pocas emisiones hasta la implantación más eficiente de coches híbridos y eléctricos.

No obstante, los motores HCCI no solo presentan importantes ventajas, sino que es necesario entender también sus principales limitaciones.

2.5. Ventajas e inconvenientes de los motores HCCI

Los motores HCCI presentan una serie de ventajas e inconvenientes en comparación a los motores MEP y MEC:

- **Ventajas:** El motor con sistema HCCI tiene mayor rendimiento que un motor de gasolina en carga baja y media y similar al de un motor Diésel a causa de una combustión rápida llevada a cabo con una elevada relación de compresión y el empleo de mezcla muy pobre y una admisión de aire sin estrangular. Tiene además un consumo de combustible reducido y menor que en los motores Diesel.

En cuanto a las emisiones, se reduce la emisión de NOx hasta niveles muy bajos debido al empleo de mezcla pobre y homogénea que permite trabajar con temperaturas más bajas. Tienen menores emisiones de hidrocarburos sin quemar y prácticamente nulas partículas de hollín que el Diésel debido a una combustión premezclada.

Además, se produce un funcionamiento del motor más estable y suave en determinados regímenes y cargas de motor y permite la posibilidad abierta de emplear varios combustibles en el mismo motor.

- **Inconvenientes:** Como inconveniente principal está la dificultad para controlar el momento exacto del autoencendido. Además, en un motor multicilindro con este tipo de sistema la transferencia de calor es aún más difícil de estabilizar y por tanto los puntos de encendido. Un cilindro que esté levemente más caliente que los otros puede comenzar la inflamación de su mezcla mucho antes, o el más frío puede incluso no quemar el combustible.

Tiene una baja potencia específica, menor que un Diésel, debido al empleo de mezclas muy pobres y limitación de funcionamiento a cargas parciales, donde sí es posible la autoinflamación descentralizada de la mezcla homogénea y la combustión no es detonante.

De esta manera se observa como a pesar de los inconvenientes comentados, las posibilidades de desarrollo del motor HCCI son mayores que las de muchos tipos de motores actuales. Por ejemplo, para la producción de motores gasolina de dos tiempos y de cilindrada superior a 100 cm³ (apropiados para la mayoría de las motocicletas) que actualmente no pueden cumplir con las especificaciones anticontaminación de EE. UU, y no se comercializan en este país.

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

Para ilustrar mejor la diferencia entre los motores Diesel y Gasolina y los motores HCCI, se presentan la siguiente **Tabla 2** y la **Figura 5**. Cabe decir que algunos aspectos, como la formación de la mezcla en el conducto de admisión expuesto en la tabla, es una opción (indicada así por la facilidad para formar la mezcla homogénea), pero también existe la posibilidad de que el sistema de inyección sea de tipo directa.

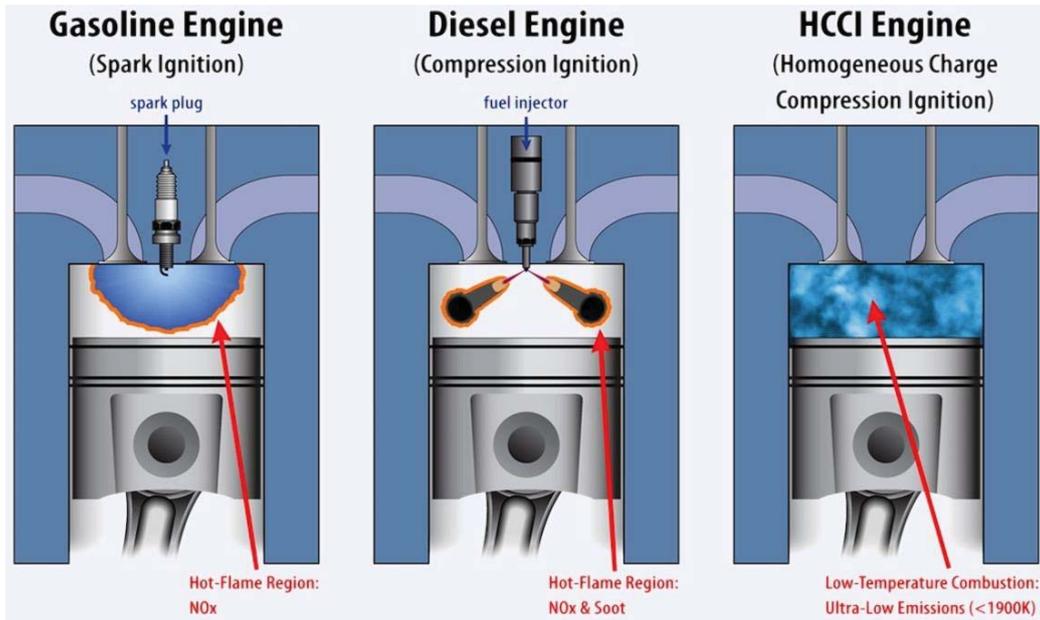


Figura 5 Funcionamiento de un motor HCCI en comparación a motores Diesel y Gasolina.

Fuente: www.pistonudos.com

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

	Motor gasolina inyección indirecta	Motor gasolina inyección directa y mezcla pobre	Motor Diesel	Motor HCCI
Lugar de formación de la mezcla:	en el conducto de admisión	en la cámara de combustión	en la cámara de combustión o en la precámara	en el conducto de admisión
Distribución de la mezcla en el cilindro:	homogénea	estratificada: rica en torno a la bujía, pobre en el resto de la cámara	estratificada: rica en torno al punto de inyección, pobre en el resto de la cámara	homogénea
Proporción de la mezcla:	estequiométrica ($\lambda = 1$)	pobre o muy pobre	muy pobre	muy pobre ($\lambda > 1,2$)
Regulación de la carga:	cantidad de mezcla, con válvula de mariposa	cantidad de combustible	cantidad de combustible	cantidad de combustible
Tipo de Encendido:	chispa	chispa	autoinflamación	autoinflamación
Presión de inyección:	baja	alta	muy alta	baja
Relación de compresión aproximada:	entre 8 y 12 a 1	entre 10 y 13 a 1	Entre 17 y 23 a 1	Entre 20 y 30 a 1

Tabla 1 Comparación entre motores HCCI y motores Gasolina y Diesel.
Fuente: www.km77.com

2.6. Conclusiones

A lo largo de este capítulo ha quedado demostrado que la importancia de las emisiones contaminantes en el sector del transporte, o más concretamente, de la reducción de emisiones contaminantes, es uno de los factores que más preocupan a los fabricantes de automóviles debido a que las restricciones impuestas sobre estas por las normativas europeas vuelven cada vez más compleja su producción y obligan al desarrollo de nuevas tecnologías o alternativas a los motores térmicos convencionales (MEC y MEP).

Dentro de estas soluciones, se encuentran tanto el desarrollo de motores eléctricos e híbridos (en auge, pero todavía con limitaciones importantes) como el uso de tecnologías de reducción de emisiones. Dentro de estas soluciones existe una que ha ido desarrollándose a lo largo de los años denominada tecnología HCCI. Los motores HCCI son motores MCI (motores de combustión interna alternativos) que combinan las ventajas de los Diesel y gasolina, reduciendo por tanto las emisiones y el consumo y aumentando el rendimiento. Este tipo de motor, por tanto, es considerado como una posibilidad real de solución a los motores térmicos actuales y de transición a unos motores híbridos y eléctricos con menores limitaciones.

Por esta razón, en este trabajo de fin de grado se ha decidido estudiar a los motores HCCI, dado que constituyen una prometedora solución al problema actual en el sector del transporte de las emisiones.

3. Motores HCCI

3.1. Funcionamiento

Es debido a que constituye una prometedora solución al problema de las emisiones comentado y a todas las ventajas que se le atribuyen a este tipo de motor, que se hace necesario llevar a cabo un estudio en profundidad de los motores HCCI, que sirva tanto de justificación para todas las características y ventajas que se le atribuyen, como para exponer su situación actual. Para ello, en primer lugar, es necesario entender su funcionamiento.

Este tipo de motores se basan en la ignición de una mezcla estratificada por compresión controlada y autoignición con un sistema de turbosobrealimentación añadido, de tal forma que el encendido ocurre casi simultáneamente en toda la cámara. Además, debido al uso de una mezcla tan pobre, son necesarias relaciones de compresión elevadas de valores entre 18:1 hasta 30:1 para producir la combustión.

Así, algunas acciones llevadas a cabo para implementar este modo de combustión generalizada controlada son el uso del método EGR (recirculación de gases de escape), que permite controlar la combustión detonante modificando el grado de carga, y un adelanto de la inyección para permitir que se lleve a cabo la formación de una mezcla homogénea consiguiendo una combustión premezclada (sin emisión de partículas) combinada con una reducción de la formación de NO_x.

No obstante, el uso de esta tecnología está muy limitado a baja carga debido a que a altas cargas se producen fenómenos de detonación incontrolados dado que el proceso de combustión está controlado en gran medida por la cinética química de las reacciones y, por lo tanto, resulta muy complejo controlar cómo y en qué puntos se produce la combustión a altos niveles de carga.

Es por ello, que a lo largo de los años se han llevado a cabo investigaciones para evitar la combustión detonante que puede aparecer en altas cargas utilizando soluciones variadas como el uso de relaciones de compresión variables, la regulación del sistema de distribución, el empleo de un sistema de control electrónico para la apertura variable de válvulas, llevar a cabo una inyección directa de combustible justo después del cierre de las válvulas de escape para evitar la detonación o utilizar diferentes combustibles, que han facilitado el desarrollo de este tipo de motores.

Así, desde hace años se han desarrollado motores experimentales con combustión HCCI gracias a los múltiples estudios realizados sobre esta tecnología. Un ejemplo importante es el del motor Honda EXP-2 de motocicleta. Este motor es de dos tiempos, con 400 cm³ de cilindrada y monocilíndrico. Finalizó el Rally Granada-Dakar de 1997 en quinta posición con un consumo muy reducido y bajas emisiones contaminantes. Con este avance se abrió la posibilidad del uso de motores de dos tiempos HCCI para motocicletas, de tal manera que un año más tarde apareció el scooter Pantheon de 125 cm³ con este tipo de combustión.

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

Por otro lado, la Universidad de Berkeley y el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, también llevaron a cabo el desarrollo un motor híbrido a partir de un HCCI. Es monocilíndrico y funciona con gas natural, butano y otros combustibles. Además, permite modificar su relación de compresión y dispone de un calentador del aire de admisión de 6 kW. Este motor tiene unas emisiones de NO_x y partículas bajísimas y dispone de una potencia aceptable. También han modificado el motor 1.9 TDI de VW (Diésel), inyección directa, 4 cilindros y 8 válvulas, haciéndolo funcionar de forma eficiente con propano y metano.

El SouthWest Research Institute también ha desarrollado un motor HCCI, monocilíndrico de gasolina, que tiene menores emisiones de NO_x y HC a cargas medias respecto a un motor de inyección directa de gasolina, y en la Universidad Politécnica de Madrid ha investigado este tipo de combustión tomando como base un motor Derbi de 50 cm³ de refrigeración por aire, al que se le ha acoplado una válvula de escape.

Otras investigaciones en curso actualmente, y que parten de la tecnología de combustión HCCI, se basan en estudios de sistemas para desarrollar motores diésel para camiones y autobuses con niveles muy bajos de emisiones de NO_x y partículas de modo que cumplan las restricciones impuestas a las emisiones por las normas EURO.

Así, la tecnología HCCI ha seguido una evolución a lo largo de los años gracias a diferentes investigaciones enfocadas a la obtención de motores térmicos con la capacidad de funcionar con rendimientos y potencias elevadas y equiparables a los motores convencionales, pero con unas muy bajas emisiones. No obstante, su implantación en el mercado automovilístico no se ha hecho efectiva hasta la fecha.

Actualmente, fabricantes de automóviles como Mazda, PSA, Daimler-Chrysler o Ford, han investigado las posibilidades que ofrecen los motores HCCI y como se puede llevar a cabo su implantación en el mercado automovilístico, siendo Mazda el más avanzado, dado que lanzará al mercado un automóvil con un motor con funcionamiento muy similar al funcionamiento HCCI en los próximos años.

Este motor diseñado por Mazda, a partir del cual surge la motivación para la realización de este trabajo de fin de grado, es el Skyactive-X 2.0 TDI y presenta una tecnología de combustión derivada de la tecnología HCCI con el objetivo de solucionar los problemas técnicos más importantes como la gestión del momento exacto de autoencendido (evitar combustiones incontroladas). Para solucionar estos problemas el motor de Mazda cuenta con un sistema SPCCI (Spark Controlled Compression Ignition) y sobrealimentación mediante compresor.

De esta manera, la solución para llevar a cabo la ignición por compresión a bajas-medias cargas requerida se basa en el sistema SPCCI mediante el cual se controla el momento de encendido realizando una pequeña inyección piloto de mezcla rica cerca de la bujía durante la carrera de compresión del pistón para ayudar a llevar a cabo un proceso de combustión global en todo el volumen del cilindro excepto en la parte superior de la cámara de combustión alrededor de la bujía y en la parte central del cilindro.

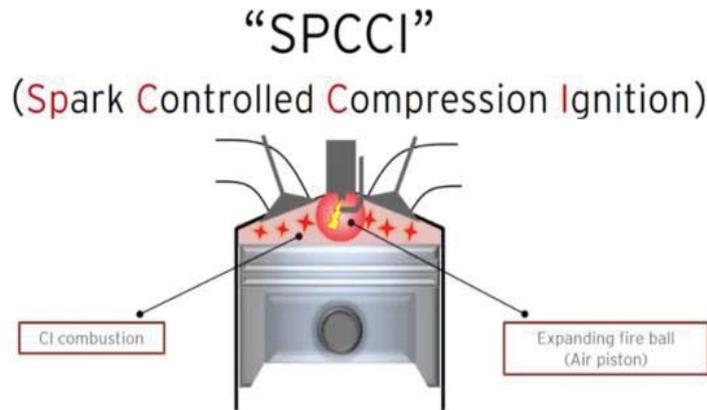


Figura 6 Modelo gráfico de combustión SPCCI.

Fuente: <http://www.greencarcongress.com>

Por otro lado, el sistema de turbosobrealimentación instalado permite introducir más aire en el motor (necesario para mantener una mezcla muy pobre).

Cabe añadir que en regímenes altos se aplica un mecanismo para el mayor control del autoencendido de la mezcla. Este mecanismo se basa en que mientras el sistema de distribución produce un retraso al cierre de la válvula de admisión (RCA) durante la fase de compresión el compresor se desconecta para bajar los valores de presión alcanzados en el cilindro.

Por tanto, para llevar a la práctica esta tecnología se puede optar por múltiples configuraciones, atendiendo a sus múltiples posibilidades de uso de diferentes combustibles, relaciones de compresión, etc., no obstante, una opción adecuada sería la de un motor de cuatro tiempos que a bajas-medias cargas funcione con combustión HCCI y a plena carga funcione con encendido provocado por bujía y mezcla estequiométrica, controlando electrónicamente el cambio de un sistema a otro. Así se evita el fenómeno de detonación y se consigue mayor potencia. Otra opción sería la de un motor híbrido HCCI-eléctrico para vehículos urbanos, o la utilización en un mismo motor de diferentes tipos de combustible con mayor tolerancia a los fenómenos de detonación.

Dentro del uso de motores HCCI, es importante hablar también de la utilización de sistemas de reducción de emisiones complementarios, algunos de los cuales son de utilidad también para el control del funcionamiento del propio motor para evitar, a altas cargas, los fenómenos detonantes.

3.2. Control de emisiones contaminantes

Aunque los motores HCCI se caracterizan por una menor cantidad de emisiones contaminantes, se pueden aplicar, además, sistemas complementarios para reducir emisiones. En este capítulo se procede a describir las principales tecnologías de reducción de emisiones contaminantes aplicables a motores HCCI.

El primero de los métodos es el de recirculación de gases de escape (EGR). Se trata de un método de reducción de NO_x totalmente generalizado actualmente en todo tipo de motores por su elevada eficiencia. Esta tecnología consiste en hacer recircular una parte de los gases de escape producidos como consecuencia del proceso de combustión hacia el colector de admisión, siendo previamente enfriados, de tal forma que se consigue una menor cantidad de oxígeno disponible para quemar y por lo tanto permite alcanzar temperaturas más bajas durante el proceso de combustión que tiene como consecuencia una elevada reducción de las emisiones de NO_x . No obstante, este método tiene efectos negativos en cuanto a la reducción de emisiones de CO, debido a que al haber menor presencia de O_2 , el CO no se oxida completamente. Cabe comentar que la utilización de EGR es más importante y efectiva a altas cargas, donde el motor HCCI está limitado debido a que el proceso de combustión se hace más difícil de controlar y las emisiones aumentan. Es por ello, que como se ha explicado la variación del porcentaje de EGR utilizado constituye también un método de control de la combustión a altas cargas, en tanto que con ello se puede controlar su inicio.

Otro método muy generalizado es el uso del catalizador de tres vías, el cual permite la oxidación de CO y HC mediante la presencia de O_2 o NO, a la vez que reduce las emisiones de NO_x con reductores como HC, CO o H_2 . El inconveniente principal de este método es la necesidad de que el motor trabaje en dosado estequiométrico para que sea efectivo, por lo que en el caso de los motores HCCI (que trabajan con mezclas esquiométricas) será conveniente combinarlo con trampas de NO_x que permiten la reducción de emisiones con mezcla pobre. Una alternativa a esta solución sería el uso de una tecnología usada también motores Diésel como es el LNT, basado en un sistema de trampas de NO_x . Esta tecnología tiene un funcionamiento basado en dos fases, una primera con funcionamiento normal mientras el motor sigue su ciclo de operación típico con valores de $Fr \ll 1$ (dosaje muy pobre), de forma que oxida el NO en NO_2 y captura ese NO_2 con hidróxido o carbonato de bario, y una segunda fase dedicada a la regeneración de la trampa y que se activa cada 1 minuto aproximadamente a partir de una señal enviada por un sensor de NO_x , donde el motor funciona con $Fr > 1$ (dosaje rico) y provoca una mayor presencia de CO que reduce los NO_x como en un catalizador de tres vías común.

Un tercer método específico de los motores HCCI, es el adelanto de la inyección. Este método tiene como objetivo acelerar el proceso de formación de la mezcla de forma que la combustión (que en estos casos es por autoignición) sea de tipo premezclado y por tanto se evite la formación de hollín. Además, este método, combinado con el uso de una segunda inyección es otra de las soluciones al control de la combustión.

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

A raíz de lo explicado, se observa como los motores HCCI serían perfectamente capaces de funcionar en un automóvil normal sino fuera por la limitación que supone su mal funcionamiento a altas cargas. Este factor es el principal causante de que actualmente no se haya implantado en el mercado, no obstante, a lo largo de los años se han llevado a cabo estudios enfocados en analizar las ventajas y características anteriormente nombradas de estos motores para potenciarlas, así como, sobre las diferentes soluciones que se pueden aplicar a las limitaciones que poseen, tales como el uso de EGR o el uso de segunda inyección. Es en este contexto en el que se hace importante hacer un análisis en profundidad de estos estudios, los cuales son la pieza fundamental para la evolución de estos motores.

3.3. Estudios en motores HCCI

Los estudios que se exponen a continuación han sido realizados por otros autores para analizar el comportamiento de motores con funcionamiento en condiciones de carga homogénea con encendido por compresión, de forma que sirven para justificar las características y ventajas anteriormente atribuidas a los motores con tecnología HCCI, así como, las soluciones a los inconvenientes que presentan este tipo de motores.

Así, una de las ventajas anteriormente asociadas a los motores HCCI es que son capaces de funcionar con una amplia gama de combustibles con elevada eficiencia, lo cual hace posible el uso de biocombustibles o de mezclas de combustibles convencionales con biocombustibles. Este tipo de aplicación ha sido probada en estudios como el llevado a cabo por (Coskun & otros, 2017) sobre un motor Ricardo Hydra Single-Cilinder con funcionamiento HCCI operando con un combustible obtenido de la mezcla en diferentes proporciones de tolueno y n-heptano. En este estudio se analizan mediante la herramienta de simulación Stochastic Reactor Model (SRM) tres casos para obtener los efectos que producen tanto en las emisiones, como en la presión y transmisión de calor en el cilindro, la variación de las proporciones en la mezcla de combustible de tolueno y n-heptano o del dosado con el que opera el motor.

Otro estudio importante llevado a cabo en este campo de aplicación fue el realizado por (Maurya Kumar & Akhil, 2017) en el que se utiliza hidrógeno como combustible, el cual al no tener carbono en su composición no produce CO₂ ni CO. El análisis llevado a cabo se basa en analizar la combustión de un motor Kirskar AV1 en funcionamiento HCCI con diferentes mecanismos de simulación para, validando cada uno con los datos experimentales de partida, obtener qué modelo reproduce mejor el comportamiento del motor.

Un combustible muy utilizado en investigaciones sobre motores HCCI es el gas natural, un combustible que tiene grandes ventajas en relación a su gran disponibilidad, menos contaminante que el resto de los combustibles fósiles y con unas buenas propiedades para la rápida formación de la mezcla homogénea. De esta forma, en estudios como los realizados por (Poorghasemi & otros, 2016) o (Atikol & otros, 2014) sobre un motor Waukesha CFR y (Caton Jerald, 2012) sobre un motor Yanmar Single-Cylinder, se demuestra como con el uso de gas natural como combustible único o mezclado con otros combustibles como el n-heptano se consigue un motor con alta eficiencia y bajas emisiones.

En estos estudios, por tanto, se analizan aspectos como las emisiones de motores HCCI operando con gas natural, el efecto de la mezcla de gas natural con otros combustibles como RG (Reformed Gas) que es una mezcla de H₂ y CO o la comparación en el funcionamiento del motor HCCI funcionando con otros combustibles como la gasolina (iso-octano).

En algunos de los estudios ya comentados se analiza también el efecto del EGR en las emisiones producidas o en el control de la combustión. Este último concepto es muy importante en el estudio de la combustión en motores HCCI, dado que como ya se ha comentado en diversas ocasiones, es el factor más limitante a la hora de conseguir la implementación de este tipo de motores en el mercado. Así, además del uso de EGR, el cual está más enfocado a la reducción de emisiones, se hace uso de relaciones de compresión variables o métodos de control del tiempo de inyección para controlar el momento o comienzo del instante de la combustión (SOC).

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

De esta manera, el uso de doble inyección con objeto de controlar la combustión fue utilizado en el estudio llevado a cabo por (Turkcana, Altinkurta, Coskunb, & Canakci, 2018) en un motor Super Star 7716. En esta simulación se estudian los efectos de llevar a cabo una segunda inyección y usar mezclas de alcohol (etanol y metanol) y gasolina en distintas proporciones en la combustión en forma HCCI y sus principales emisiones contaminantes (CO y NO_x). Además, también se estudia la distribución espacial del combustible inyectado en el segundo periodo que no llega a vaporizarse del todo y las temperaturas y emisiones de NO producidas.

Por último, el uso de relaciones de compresión variables es un método también muy estudiado, y en el año 2007, (Ruizhi, Tiegang, Longbao, Shenghua, & Wei, 2007) analizaron los efectos de la variación de la relación de compresión en la combustión de un motor HCCI que funciona con dimetil-éter (DME) como combustible.

Cabe resaltar la importancia de las herramientas de simulación utilizadas en los estudios comentados, donde se utilizan herramientas varias tanto de zona única o multizona, como CFD. Así, los modelos de zona única son particularmente útiles en estudios paramétricos debido a su eficiencia. Sin embargo, la suposición de una mezcla homogénea en modelos de una zona única elimina cualquier información espacial que pudiera ser importante para predecir la ignición y la formación de emisiones. Los modelos multidimensionales se utilizan para resolver directamente la mecánica de fluidos y la cinética química simultáneamente y, por lo tanto, pueden proporcionar la mejor precisión cuando se comparan con los datos del experimento.

En la actualidad, la mayor limitación de los modelos CFD sigue siendo la alta intensidad computacional, especialmente cuando la cinética detallada se combina con la mecánica de fluidos utilizando mallas finas. Se utilizan modelos cuasi-dimensionales y multizona para aplicar cinética detallada a múltiples zonas con diferentes condiciones iniciales que se extraen de las simulaciones CFD. Estos modelos podrían proporcionar una mejor precisión que los modelos de una sola zona y requieren mucho menos tiempo de cálculo que las simulaciones CFD.

Estas herramientas permiten a los autores de estos estudios analizar el efecto de diferentes factores a la combustión en modo HCCI. Así, un factor muy analizado en el campo de estudio de estos motores es su capacidad para funcionar con combustibles variados que van desde la gasolina, el gas natural o biocombustibles a combustibles menos utilizados en los automóviles como el hidrógeno, el n-heptano, el butanol, etc. Este aspecto característico de los motores HCCI resulta una de las ventajas importantes de estos motores. Por esta razón, resulta necesario hacer una comparación de los principales combustibles utilizados (según los propios combustibles utilizados en los estudios) en los motores HCCI, para determinar cuál de ellos sería una mejor opción y evaluar sus ventajas e inconvenientes.

3.3.1. Principales combustibles para motores HCCI

Una de las ventajas de los motores HCCI es su capacidad de poder funcionar con distintos tipos de combustibles con elevada eficiencia, lo cual hace posible el uso de combustibles menos contaminantes e incluso la combinación de diversos combustibles en un mismo motor. Por esa razón, resulta de interés el estudio de los principales combustibles (de entre muchos otros como los nombrados anteriormente) que se pueden utilizar en estos motores como son la gasolina, el gas natural o mezclas de alcohol-gasolina.

Así, en primer lugar, el uso de la gasolina tiene como principales ventajas que actualmente existe un elevado conocimiento sobre este combustible y sobre la tecnología necesaria para su uso en motores de automoción. No obstante, este combustible al igual que el Diesel es un combustible fósil y por tanto contaminante, pero su principal desventaja en motores HCCI es el problema presente en los motores que usan gasolina, la detonación. En los motores HCCI la combustión de la mezcla tiene lugar por compresión, por lo que es necesario usar altas relaciones de compresión y altos picos de presión para lograrla (valores mucho más altos que en motores gasolina normales), estos factores aumentan el riesgo de detonación y limitan su uso.

Una forma de reducir tanto el riesgo de detonación como las emisiones contaminantes aumentando al mismo tiempo la eficiencia del motor, es el uso de mezclas de alcohol (etanol) y gasolina. En un estudio de investigadores de la Universidad de Salamanca se determinó que con el uso de un porcentaje de etanol del 20% mezclado con gasolina aumenta la potencia del motor, disminuye las emisiones de monóxido de carbono y el consumo y aumenta el octanaje. El uso de etanol es creciente debido a que es un biocombustible procedente de la destilación de cereales ricos en azúcar. Así, en España se está empezando a implementar en motores de gasolina y en países como Estados Unidos y Brasil ya existen en las gasolineras combustibles formados de la mezcla de etanol-gasolina.

Por último, destaca el uso del gas natural, el cual es un combustible fósil al igual que la gasolina y el Diesel, pero su uso es menos contaminante. Así, representa grandes ventajas respecto tanto a los combustibles más usados como el diésel o la gasolina, como a otros biocombustibles debido tanto a las ventajas comentadas anteriormente de gran disponibilidad, facilidad para la formación homogénea de la mezcla y menor contaminación, como a factores de gran importancia para la eficiencia de la combustión como son su buen poder calorífico (mayor que el de la gasolina) y estabilidad química. Además, la tecnología para el uso de este tipo combustibles en motores está ya muy desarrollada, en tanto que se han desarrollado motores de gas natural en los que el gas se almacena en un depósito en estado gaseoso a presiones de entre 200 y 250 bar (principal desventaja debido a la necesidad de contar con un depósito a las altas presiones en el propio automóvil). Estos motores favorecen el aumento de la vida útil del motor ya que no generan tanto desgaste en los cilindros y generan menos emisiones como el CO₂ al tener un alto índice de hidrógeno por carbono.

Así, de los combustibles comentados destaca el uso de gas natural, el cual, aunque no es tan utilizado actualmente como la gasolina o el Diesel, presenta unas ventajas importantes que le hacen tener cabida tanto en el sector del transporte actual, como en los motores HCCI donde la reacción de combustión, como ya se ha dicho, está controlada por la cinética-química del proceso.

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

Todos los estudios comentados (además de los muchos existentes sobre motores con tecnología HCCI) justifican las ventajas atribuidas a los motores HCCI y han resultado en la puesta en marcha y desarrollo de motores experimentales que son capaces de funcionar en condiciones diversas de combustibles, presión de admisión, relación de compresión, etc., para la sustitución de los motores térmicos convencionales.

3.4. Conclusiones

Los motores HCCI presentan un funcionamiento característico que les permite tener unas reducidas emisiones. Así, su funcionamiento se basa en la ignición de una mezcla estratificada mediante la aplicación de presión. Esto es posible gracias al uso de relaciones de compresión elevadas y un turbocompresor. No obstante, el principal inconveniente de estos motores es el estar limitado a baja carga, dado que a alta carga se producen fenómenos de detonación. Este factor es el que ha limitado su uso y es por ello por lo que, durante años, se han investigado y desarrollado motores HCCI experimentales con el objetivo de probar las soluciones al problema de la detonación y llevar a cabo su puesta en marcha.

Es dentro de este contexto donde se vuelven importantes los mecanismos auxiliares para la reducción de emisiones y el control del momento de la combustión como el EGR, el uso de combustibles con baja tendencia a la detonación, el control del tiempo de inyección o el uso de relaciones de compresión variables. Todos estos métodos han sido abundantemente estudiados, de tal forma que se han analizado tanto sus ventajas en cuanto emisiones, capacidad de funcionar con múltiples combustibles, etc., como los métodos de solución a sus limitaciones.

Así, en este capítulo se justifican, mediante estudios realizados por otros autores, las ventajas de estos motores, dentro de las cuales destaca la capacidad de estos para funcionar eficientemente con una gran diversidad de combustibles, un aspecto que representa una de las grandes posibilidades que ofrece este tipo de motor para la reducción de emisiones contaminantes. Así, por encima de otros combustibles, se resalta la posibilidad de utilizar gas natural o mezclas de alcohol y gasolina como combustibles, los cuales actualmente son abundantes y con un elevado grado de maduración en cuanto a su uso y tecnología necesaria. El uso de estos combustibles, junto con el uso de EGR, hace que estos motores sean aún menos contaminantes, y con ello, los estudios descritos anteriormente demuestran la gran diversidad de posibilidades que los motores HCCI ofrecen para tener unas reducidas emisiones.

Por otro lado, también se exponen estudios realizados para analizar las soluciones empleadas para el control de la combustión. Tales como el uso de combustibles que en mayor o menor proporción retrasen o avancen la combustión (como el n-heptano) o el uso de doble inyección y relaciones de compresión variables.

Este capítulo, por tanto, sirve tanto para explicar el funcionamiento y las tecnologías auxiliares a utilizar para la reducción de emisiones y el control de la combustión en motores HCCI, como para justificar todas las ventajas y el comportamiento característico atribuido a este tipo de motores y para determinar cuál ha de ser el camino a seguir en el desarrollo de este trabajo de fin de grado.

Así, a partir de todos los datos expuestos se ha decidido llevar a cabo una simulación centrada en estudiar las emisiones en un motor HCCI funcionando con gas natural como combustible que sirva de justificación de las reducidas emisiones que este tipo de motores presentan, factor que constituye la razón por la cual se ha decidido estudiar este tipo de motor.

4. Motor base y programas utilizados para la simulación

4.1. Introducción

A partir de esta simulación se pretende introducirse en las herramientas de simulación necesarias para el entendimiento completo de estos motores. De tal forma que, en este caso, debido a que el motor HCCI se caracteriza por tener unas emisiones menores que los motores convencionales, se pretende analizar mediante el procedimiento y los datos que se indican a continuación, las emisiones de NO_x , CO y CO_2 que producen estos motores, las cuales están entre las emisiones de mayor producción por los motores térmicos actualmente, además de estar fuertemente limitadas y restringidas por las normas EURO, para demostrar los reducidos valores que se obtienen mediante este tipo de proceso de combustión.

De esta forma, dentro de este capítulo se va a hablar tanto de los materiales utilizados para la obtención de los parámetros que definen el motor de estudio y que servirán junto con los datos experimentales de emisiones para la validación del modelo CFD, como de los programas utilizados para realizar la simulación.

Se muestran, por tanto, en primer lugar, los datos experimentales obtenidos del estudio experimental llevado a cabo en un análisis sobre un motor monocilindro en condiciones de funcionamiento HCCI (motor base de estudio) con gas natural como combustible, lo cual permitirá comprobar los resultados obtenidos mediante la simulación CFD con los resultados obtenidos del estudio experimental y, por tanto, validar el funcionamiento del modelo CFD diseñado.

4.2. Motor base de estudio

Este trabajo se centra en el análisis del funcionamiento del motor HCCI a bajas cargas, donde este tipo de combustión es posible. Para ello, con el objetivo de realizar el modelado de la geometría 3D y los análisis sobre ella, correspondientes a este trabajo de fin de grado, ha sido necesario sustentarse en datos base aportados de un motor con funcionamiento HCCI. Así el motor utilizado como base experimental para este estudio es el motor Waukesha CFR utilizado en un estudio llevado a cabo por (Poorghasemi & otros, 2016) para la caracterización tanto del funcionamiento como de las emisiones producidas por un motor HCCI operando con gas natural como combustible denominado *“3D CFD simulation of a natural gas fueled HCCI engine with employing a reduced mechanism”*.

Dado que el objetivo de la simulación que se va a realizar en este trabajo de fin de grado es analizar las emisiones reducidas que es capaz de generar un motor en funcionamiento HCCI, los resultados experimentales sobre las emisiones de este motor de estudio son los que se utilizarán como resultado experimental de partida para la comparación de resultados. No obstante, para poder llevar a cabo el análisis, mediante las herramientas de simulación que se comentarán más adelante, es necesario definir en primer lugar, los parámetros característicos de este motor que determinan en qué condiciones funciona (flujos máscicos de aire y combustible, velocidad, temperaturas, presión de sobrealimentación, etc.).

4.2.1. Parámetros del motor base de estudio

Antes de detallar los parámetros característicos del motor base de estudio es necesario definir los conceptos ligados a estos parámetros:

- Diámetro del cilindro (D): Tiene un valor ligeramente superior al del pistón con el objetivo de que se consiga el deslizamiento entre ellos.
- Carrera (S): El valor de la carrera se determina como la distancia recorrida por el pistón entre el PMS (punto muerto superior) y el PMI (punto murto inferior).
- Relación carrera-diámetro (S/D): La carrera y el diámetro del cilindro son los parámetros que mejor caracterizan el tamaño del motor. A partir de su relación S/D podemos además clasificar los motores en cuadrados (S/D = 1), alargados (S/D < 1) y supercuadrados (S/D > 1, característico de los motores de competición).
- Cilindrada unitaria (Vd): Es el volumen desplazado en un cilindro en toda su carrera. El producto de Vd por el número de cilindros (z) nos da el valor de la cilindrada total del motor.

$$Vd = A_{piston} * S = \frac{Vt}{z}$$

Ec. I

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

- Volumen de la cámara de combustión (V_{cc}): Es el volumen mínimo que se alcanza durante la fase de compresión y por tanto donde se inicia la combustión.
- Relación de compresión (r_c): Se calcula como la relación entre V_d y V_{cc} :

$$r_c = \frac{V_d + V_{cc}}{V_{cc}}$$

Ec. II

- Régimen de giro (n): Hace referencia al número de revoluciones que se llevan a cabo en un motor por unidad de tiempo.
- Gasto de aire y combustible: Es el caudal másico admitido en el cilindro por unidad de tiempo.
- Presión de admisión: Es el parámetro fundamental para el control del llenado del cilindro. Se puede aumentar mediante el uso de sobrealimentación.

Una vez definidos los parámetros, a continuación, se detallan los parámetros característicos que definen el motor base de estudio, diferenciando los principales parámetros geométricos, de funcionamiento y efectivos, que establecen las condiciones de funcionamiento de dicho motor:

Parámetros	Motor Base
S (mm)	114,3
D (mm)	82,55
S/D	1,3846
Vt (cm3)	612
z	1
Vd (cm3)	612
r_c	16,9:1
Vcc (cm3)	38,49
Presión de admisión (bar)	1,47
Temperatura de admisión (K)	480
mf (g/s)	0,10402
ma (g/s)	3,882
n (rpm)	700
Combustible	Metano

Tabla 2 Parámetros característicos del motor de estudio.

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

En primer lugar, los parámetros geométricos (S , D , z , V_t , S/D) característicos del motor de estudio se han obtenido de la ficha técnica del motor de estudio. Cabe decir, que al tratarse un motor tipo monocilindro, en este caso el valor del volumen total desplazado es igual al volumen unitario. El valor del volumen de la cámara de combustión (V_{cc}) se obtiene mediante la **Ec. II**.

Los parámetros de funcionamiento tales como la presión y temperatura de admisión, la velocidad de funcionamiento del motor o el combustible utilizado también son obtenidos a partir de la ficha técnica de dicho motor. Cabe mencionar que, el porqué de considerar el combustible como metano puro en vez de tener en cuenta el resto de los componentes del gas natural se justifica en que en la composición del gas natural más de un 90% es metano, y, por tanto, a modo de simplificación de la cantidad de reacciones necesarias en la simulación se supone el gas natural como puramente metano en el propio estudio.

En referencia a los parámetros específicos, en el estudio experimental los flujos máscicos de aire y combustible se especifican para cada caso junto con la presión de sobrealimentación, la temperatura de admisión y la velocidad de giro del motor. Dado que este trabajo se centra en la combustión en bajas cargas o en carga estratificada, los valores de velocidad y de la presión de sobrealimentación del motor son 700 rpm y 1,47 bar.

A partir de los valores expuestos en la **Tabla 3** se obtienen tanto todos los valores de los parámetros expuestos en la **Tabla 2**, como el caso que se ha decidido a estudiar en esta simulación (Caso 1):

Case	1	2	3	4	5	6	7
Equivalence ratio (Φ)	0.45	0.40	0.42	0.64	0.53	0.61	0.72
NG mass rate (mg/s)	104.02	88.01	93.46	84.43	90.38	81.623	86.06
Air mass rate (g/s)	3.882	3.761	3.751	2.233	2.914	2.27	2.04
T_{IVC} (K)	480	460	460	460	457	485	475
P_{IVC} (bar)	1.47	1.437	1.437	1.48	1.44	1.42	1.48
EGR (%)	0.0	0.0	0.0	28.00	23.11	33	41
RPM	700	700	700	700	700	700	700
Geometric Compression Ratio	16.9	16.9	16.9	16.9	16.9	16.9	16.9

Tabla 3 Casos de estudio del artículo consultado.

4.3. Programas utilizados para la simulación

En este apartado se explican los programas utilizados para la obtención de los datos teóricos fruto del modelado del proceso de combustión. De esta forma por un lado se va a describir el programa utilizado para el modelado de la geometría del motor necesaria para llevar a cabo la simulación del proceso de combustión, y por otro lado el programa de análisis CFD con el que se ha llevado a cabo dicha simulación.

4.3.1. Inventor

El modelado del volumen de control entendido como el conjunto formado por el cilindro y la cámara de combustión a la que llegan los colectores de admisión y escape se ha llevado a cabo mediante el programa de diseño Autodesk Inventor Profesional 2018.

Para la creación de dicha geometría se ha hecho uso de los principales parámetros geométricos descritos en el apartado de parámetros característicos. De esta forma se ha creado por un lado el sistema cilindro, por otro el sistema cámara de combustión junto con los orificios y colectores correspondientes de admisión y escape y las válvulas, para, por último, ensamblar el conjunto.

No obstante, cabe decir que para el análisis mediante códigos CFD el dominio utilizado se ha reproducido de forma simplificada como un mismo dominio formado por el conjunto cilindro-cámara de combustión junto con los orificios correspondientes de entrada de aire y combustible y de salida de gases de escape.

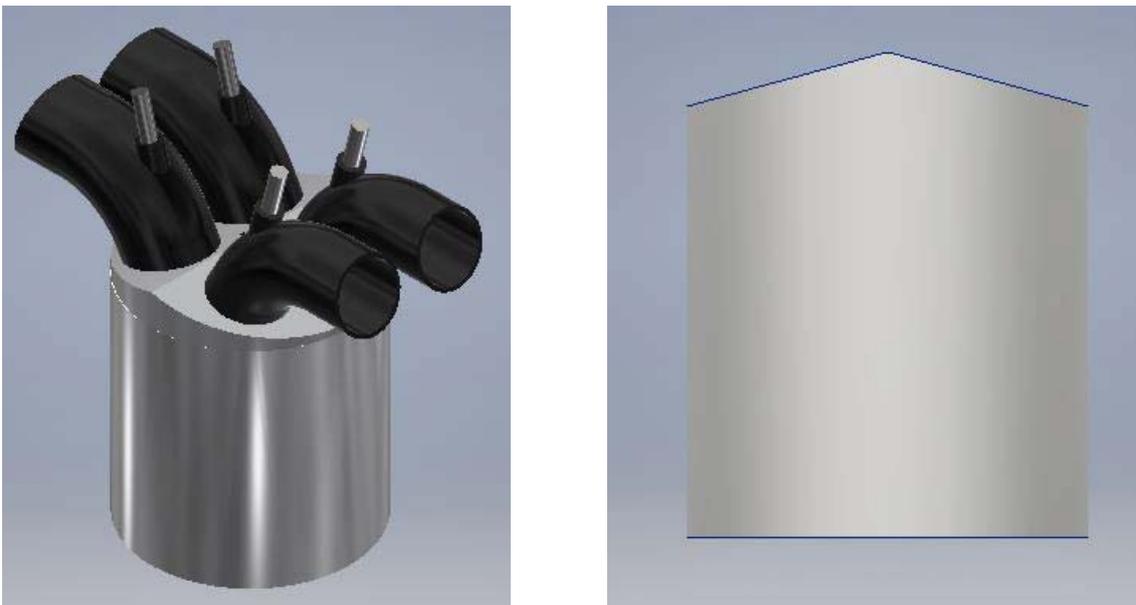


Figura 7 Modelo completo de la geometría 3D en conjunto (Izquierda) y modelo 3D utilizado para el análisis mediante ANSYS (Derecha).

4.3.2. ANSYS CFX

Para la simulación de la combustión y sus emisiones se ha hecho uso de la herramienta CFD ANSYS. La utilización de la dinámica computacional ha supuesto desde hace años una herramienta de avance y simplificación de problemas de modelado de procesos tales como el de combustión que de otra forma supondrían problemas casi inabordables. Así, los códigos CFD han supuesto una reducción en tiempo y costes de nuevos diseños, la posibilidad analizar sistemas que experimentalmente serían muy difíciles de estudiar y la posibilidad de analizar sistemas en diferentes condiciones de trabajo y contorno.

En este contexto, dentro de este trabajo de fin de grado, para desarrollar los motores HCCI un aspecto fundamental a controlar es el momento de inicio de la combustión de forma que sea controlada y descentralizada. Para controlar este aspecto se deben llevar a cabo mecanismos de análisis de la distribución de la temperatura, origen de emisiones contaminantes, etc. Por ello, es necesario utilizar modelos informáticos de mecánica de fluidos y cinética química para el control de la relación de compresión y de la temperatura del aire de admisión a bajos regímenes, ya que controlando estos dos parámetros controlamos el inicio del encendido.

A raíz de lo explicado, se observa como un análisis CFD de un proceso de combustión es algo complejo y que requiere de extensos conocimientos de física, química, cinética de reacción, etc., y adquiere todavía más complejidad en un caso como el que trata este trabajo donde la combustión se lleva a cabo por autoignición. En este trabajo de fin de grado, por tanto, se pretende utilizar, a modo de introducción al CFD, como herramienta complementaria para conocer mejor los motores HCCI y partiendo de una base muy básica en lo referente a la simulación de procesos de combustión y fluidodinámicos, el análisis CFD para la obtención de los valores de sus emisiones contaminantes CO_2 , CO y NO_x .

La herramienta para la simulación de fluidos utilizada en este trabajo, como se ha dicho, es ANSYS, que se trata de un software de ayuda para encontrar soluciones a problemas de ingeniería a través de la teoría de los elementos finitos para estructuras y de los volúmenes finitos para fluidos. No obstante, existen otras herramientas, como CONVERGE™ y AVLFire, para llevar a cabo análisis de dinámica de fluidos enfocados en la combustión interna de automóviles como el que se va a realizar. De estas dos aplicaciones la más conocida es CONVERGE™ que utiliza software sofisticado de mallas móviles, flujos multifásicos y combustión turbulenta.

Las razones, por tanto, de elegir ANSYS como herramienta para llevar a cabo el estudio son, en primer lugar, la posibilidad de contar con una versión gratuita del mismo, denominada versión de estudiante, y sobre la que ya poseo conocimientos dado que ha sido utilizada en diversas asignaturas del grado, mientras que en el caso de CONVERGE únicamente cuenta con versión de pago y nunca ha sido utilizada, lo que supone una gran novedad en cuanto al conocimiento de sus capacidades y límites. Y, en segundo lugar, ANSYS se basa en un potente software que permite realizar este estudio de forma completa considerando múltiples parámetros y condiciones tanto mecánicas como cinético-químicas por lo que supone una herramienta ideal.

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

De esta manera, para el estudio a realizar nos centraremos en la herramienta de ANSYS CFX integrada con la plataforma ANSYS Workbench y que se utiliza para el análisis y simulación de problemas de dinámica de fluidos (y otros muchos más). Esta herramienta permite llevar a cabo análisis sobre fluidos compresibles e incompresibles y de transmisión de calor en geometrías complejas mediante el método de volúmenes finitos garantizando una elevada precisión, robustez y velocidad en los cálculos.

A continuación, se pasa a describir los modelos y ecuaciones en los que se basa este programa para llevar a cabo las simulaciones deseadas.

4.3.2.1. Aproximación a las ecuaciones de Navier-Stokes

Los métodos de aproximación de las ecuaciones de Navier-Stokes de la dinámica de fluidos en ecuaciones algebraicas resolubles son tres: el método de diferencias finitas, el método elementos finitos y el método de volúmenes finitos.

No obstante, como se ha dicho anteriormente el programa de análisis CFD utilizado en este trabajo se basa en el método de volúmenes finitos. En comparación con los otros dos métodos, el método de volúmenes finitos permite una desratización conservativa de la masa, la energía y el momento y además puede ser aplicado a mallas no estructuradas debido a que no requiere de transformación de coordenadas cuando se aplica a mallas irregulares.

Este método se basa en la desratización del espacio en volúmenes finitos denominados volúmenes de control. Para cada uno de estos volúmenes se formulan las ecuaciones integrales de conservación para posteriormente aproximarlas numéricamente, aproximar los valores de las variables en las caras y las derivadas con la información obtenida de las variables nodales y conseguir finalmente una ecuación algebraica que se es capaz de resolver mediante métodos numéricos.

En este proceso, es el teorema de divergencia de Gauss, el utilizado para transformar las integrales de volumen definidas sobre operadores de divergencia y gradiente a integrales de superficie. Como ejemplo de ecuación de conservación utilizada y posteriormente transformada está la ecuación de transporte general que se define como:

$$\frac{d\rho\phi}{dt} + \nabla(\rho V\phi) = \nabla(r\nabla\phi) + S_\phi$$
$$\frac{d}{dt} \iiint \rho\phi dV + \oiint \rho V\phi dA = \oiint rV\phi dA + \iiint S_\phi dV$$

Ec. III

Una vez obtenida la ecuación como suma de integrales de superficie y volumen se lleva a cabo la aproximación de dicha ecuación de dos formas, por un lado, las integrales volumétricas se aproximan mediante cálculos basados en variables nodales y por otro lado las ecuaciones superficiales se aproximan a través de balances de las caras de los volúmenes de control ya definidos, de forma que se obtiene una ecuación basada en variables nodales de la forma:

$$V_{cell} * \frac{d\rho\phi}{dt} + \sum_f^{Nfaces} \rho_f V_f \phi_f A_f = \sum_f^{Nfaces} \Gamma_f \nabla_f \phi_f A_f + S_{\phi} * V_{cell}$$

Ec. IV

A partir de la explicación detallada del método de volúmenes finitos utilizado por Ansys CFX, se pueden explicar a continuación las principales ecuaciones CFD utilizadas por el programa para llevar a cabo los cálculos necesarios en función del análisis realizado en este trabajo fin de grado.

4.3.2.2. Ecuaciones utilizadas por ANSYS CFX

Las ecuaciones gobernantes de la dinámica de fluidos, y de forma más simplificada de ANSYS CFX, son las ecuaciones de conservación de masa, de la cantidad de movimiento y de la energía. Así todas estas ecuaciones en su forma integral se obtienen a través de la aplicación del Teorema del transporte de Reynolds:

$$\frac{d\vec{H}_{Sist}(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \iiint \vec{h} * \rho * dVC + \iint \vec{h} * \rho (\vec{v}_{r,SC} * d\vec{A})$$

Ec. V

En dicha ecuación el término $\vec{H}_{Sist}(t)$ hace referencia a una propiedad extensiva del fluido (como la cantidad de movimiento, momento, etc.) y supone los valores de la densidad ρ , la velocidad $\vec{v}_{r,SC}$ y la densidad de propiedad \vec{h} constantes en el espacio y tiempo.

- **Ecuación de conservación de masa:**

La ecuación de conservación de masa, también denominada ecuación de continuidad se establece a partir de la condición de que la materia es un invariante. Esta condición se obtiene igualando a cero la suma del flujo de masa neto en un determinado volumen de control más la variación de masa en el interior dicho volumen:

$$\frac{dp}{dt} + \nabla * (\rho\vec{V}) = 0$$

Ec. VI

Donde,

- $\frac{dp}{dt}$ es la variación de masa en el interior del volumen de control.
- $\nabla * (\rho\vec{V})$ es el balance de flujo entrante y saliente a través de la superficie del volumen de control.

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

Cuando el fluido es incompresible la variación de masa es nula y por tanto la variación de flujo también lo es. Cabe decir que, dado que no existe ningún fluido con densidad nula, la anulación de la variación de flujo es debida a que se anula la divergencia del vector velocidad $\nabla(\vec{V})$.

Transformando esta ecuación en forma diferencial a forma integral mediante el Teorema de transporte de Reynolds se obtiene:

$$\vec{H}_{Sist} = m_{Sist} \quad \rightarrow \quad \vec{h} = \frac{dm}{dm} = 1 \quad \rightarrow \quad \frac{d}{dt} \iiint \rho * dVC + \iint \rho(\vec{v}_{r,SC} * d\vec{A}) = 0$$

Ec. VII

No obstante, ANSYS CFX utiliza de forma simplificada la forma diferencial de la ecuación.

- **Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento:**

La ecuación de conservación de la cantidad de movimiento, también llamada Segunda Ley de Newton, explica cómo la rápida variación en el tiempo de la cantidad de movimiento de un determinado sistema es causa de la resultante de las fuerzas que actúan sobre este sistema:

$$\frac{DM}{Dt} = \sum F_{externas}$$

Ec. VIII

Si se considera el sistema como un volumen de control la ecuación anterior se puede definir de la forma:

$$\frac{DM}{Dt} = \frac{dM_{VC}}{dt} + M_{SC}$$

Ec. IX

De esta manera se obtiene que la ecuación integral de la cantidad de movimiento es:

$$\frac{dM_{VC}}{dt} + M_{SC} = \sum F_{externas}$$

Ec. X

Podemos observar como, por tanto, las fuerzas externas actuantes sobre el volumen de control se dividirán en fuerzas de volumen y fuerzas de superficie. Si además se entiende la cantidad de movimiento por unidad de masa promedio, la ecuación integral se puede desarrollar de forma que:

$$M_{SC} = \sum_s (\rho q \hat{v})_s - \sum_e (\rho q \hat{v})_e$$

$$\frac{dM_{VC}}{dt} + \sum_s (\rho q \hat{v})_s - \sum_e (\rho q \hat{v})_e = Fv + (F_{E \rightarrow VC})_{sup}$$

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

Las fuerzas superficiales por su parte pueden ser desarrolladas incluyendo los términos de viscosidad y presión:

$$(F_{E \rightarrow VC})_{\text{sup}} = \sum_e (F_p + F_\mu)_e + \sum_s (F_p + F_\mu)_s + (F_{E \rightarrow VC})_W + (F_{E \rightarrow VC})_{W_m}$$

Ec. XI

Así, se dispone finamente de la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento en forma integral y desarrollada. Para simplificar más esta ecuación podemos despreciar el efecto de la viscosidad y suponer las superficies de entrada y salida al volumen de control planas de forma que se obtiene la siguiente ecuación de conservación:

$$\frac{dM_{VC}}{dt} + \sum_s (\rho q \hat{v})_s - \sum_e (\rho q \hat{v})_e + F_v + (F_{E \rightarrow VC})_W + (F_{E \rightarrow VC})_{W_m} - \sum_e (pAn)_e - \sum_s (pAn)_s$$

Ec. XII

- **Ecuación de conservación de la energía:**

La ecuación de conservación de la energía se corresponde con la Primera Ley de la Termodinámica. Esta ecuación explica que la variación de la energía en un sistema es igual a la velocidad de transferencia de energía total entre dicho sistema y el entorno.

Podemos definir la ecuación integral de la energía de forma simplificada como energía total (suma de cinética, potencial e interna del sistema) igual a la suma de las energías en forma de calor y trabajo:

$\frac{DE}{Dt} = \dot{Q} + \dot{W} \rightarrow$ De forma que cuando \dot{Q} y \dot{W} sean mayores que 0 la energía se transfiere del entorno al sistema y a la inversa la energía se transfiere del sistema al entorno.

Definiendo además al sistema como un volumen de control:

$$\frac{dE_{VC}}{dt} + \dot{E}_{SC} = \dot{Q} + \dot{W}$$

Ec. XIII

Con el objetivo de desarrollar aún más la ecuación, se va a llevar a cabo por un lado el desarrollo la energía en forma de trabajo que se puede descomponer, según las fuerzas actuantes, en potencia asociada a las fuerzas de superficie y potencia asociada a las fuerzas de volumen (despreciando las potencias de fuerzas viscosas) y por otro lado, el término de la energía asociado a la superficie de control:

$$\dot{W} = \dot{W}'_V + \dot{W}_{SUP} = \dot{W}'_V + \dot{W}_m + \sum_e (\dot{W}_p + \dot{W}_\mu)_e + \sum_s (\dot{W}_p + \dot{W}_\mu)_s = \dot{W}'_V + \dot{W}_m + \sum_e (\dot{W}_p)_e + \sum_s (\dot{W}_p)_s$$

Ec. XIV

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

$\dot{E}_{SC} = (\dot{E}_m)_{SC} + \frac{d\tilde{U}_{VC}}{dt} + \tilde{U}_{SC} \rightarrow$ Donde, a modo de simplificación, si suponemos el fluido incompresible ($\rho = \text{cte.}$, como es el caso de este trabajo) $\rightarrow \frac{d\tilde{U}_{VC}}{dt} + \tilde{U}_{SC} = \dot{W}_L \rightarrow$ De acuerdo con la Segunda Ley de la Termodinámica.

Por tanto, la ecuación de conservación de la energía desarrollada será:

$$\frac{d(\dot{E}_m)_{VC}}{dt} + \sum_e (\dot{E}_m)_e + \sum_s (\dot{E}_m)_s = \dot{W}'_v + \dot{W}_m + \sum_e (\dot{W}_p)_e + \sum_s (\dot{W}_p)_s - \dot{W}_L$$

4.3.2.3. Modelos de turbulencia de ANSYS CFX

- **Modelo “Large Eddy Simulation” (LES)**

El modelo LES se basa en un filtrado espacial de las ecuaciones gobernantes de Navier-Stokes descritas anteriormente de forma que estas se resuelven descomponiendo cada variable en una parte a gran escala (parte que se resuelve) y una parte a pequeña escala que no se resuelve de modo que se asume un modelo para obtener de forma aproximada su influencia en el flujo.

Las funciones de filtro utilizadas para descomponer cada variable son de dos tipos: una rectangular y otra gaussiana. Así, esta descomposición tiene como resultado que las ecuaciones de conservación se representen como la suma de una componente de fondo filtrada y otra fluctuante:

$$f = \bar{f} + f'$$

Ec. XV

En estas condiciones, para resolver los nuevos sistemas de ecuaciones creados como consecuencia del filtrado se utilizan submodelos adicionales. El más popular y más utilizado es el submodelo de Smagorinsky debido principalmente a su gran sencillez. Este submodelo se basa en el cálculo aproximado de los valores de viscosidad, conductividad térmica y disipación a partir del modelado de los pequeños remolinos mediante un filtrado espacial de tipo rectangular.

Viscosidad: $\mu_{LES} = \rho(C_s \Delta)^2 + |\bar{S}|$

Ec. XVI

Conductividad: $k_{LES} = \frac{\mu_{LES} + Cp}{Pr}$

Ec. XVII

Disipación: $(\rho D)_{L,LES} = \frac{\mu_{LES}}{Sc}$

Ec. XVIII

- **Modelos RANS**

Los modelos RANS se basan en las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds, lo cual se lleva a cabo substituyendo cada magnitud por la suma de su valor medio y un valor de fluctuación que representa las variaciones turbulentas. De tal forma que una determinada variable pasa a representarse como:

$$f = \bar{F} + f$$

Ec. XIX

Siendo \bar{F} el valor medio y f el valor fluctuante.

En estos modelos la resolución de los sistemas de ecuaciones generados depende principalmente de las ecuaciones utilizadas para obtener el valor del tensor de tensiones τ_{ij} que representa las tensiones turbulentas de Reynolds. En este contexto el matemático y físico Joseph Valentin Boussinesq llegó a cabo una propuesta para el modelado de las tensiones turbulentas introduciendo el concepto de viscosidad turbulenta μ_t según la cual el valor del tensor de tensiones se representa de la siguiente manera:

$$\tau_{ij} = \mu_t * (2 * S_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\nabla * U))$$

Ec. XX

Siendo δ_{ij} la delta de Kronecker.

Para el cálculo de la viscosidad turbulenta existen diversos métodos dentro el propio modelo RANS:

- **Método de cero ecuaciones:**

Este es el método más sencillo dado que se basa en considerar μ_t como un valor constante o de un modo más desarrollado en el modelo de longitud mezclada de Prandtl *l_{min}* en el que se establece una relación directa entre μ_t y el gradiente de velocidades (sin necesidad de resolver ninguna ecuación adicional) de la forma:

$$\mu_t = \bar{\rho} * l_{min}^2 * \left| \frac{du}{dy} \right|$$

Ec. XXI

- **Método de una ecuación:**

Dentro de este método, aunque existen diferentes modelos de cálculo de μ_t con una ecuación, el más interesante es el de Prandtl–Kolmogorov, en el que se relaciona μ_t con la energía cinética k :

$$\mu_t = \bar{\rho} C_{\mu} l_{pk} * \sqrt{k}$$

Ec. XXII

Donde C_{μ} es una constante adimensional de valor 0.09.

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

- Método de dos ecuaciones:

Los métodos de resolución de dos ecuaciones son los más completos y más complejos que los dos métodos anteriores. Dentro de este tipo de método existen dos modelos más conocidos como son el Modelo $k-\varepsilon$ (el más utilizado) y el Modelo $k-\omega$.

Por una parte, el Modelo $k-\varepsilon$ es el más utilizado dentro de la industria debido a que ha sido validado y ha demostrado ser muy estable y robusto. Este modelo integra dentro del sistema de ecuaciones del fluido dos ecuaciones de balance en derivadas parciales en las que aparecen interrelacionados los valores de la energía cinética turbulenta k y su velocidad de disipación ε para el cálculo de μ_t :

$$\mu_t = \bar{\rho} C_\mu * \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Ec. XXIII

Por otra parte, el Modelo $k-\omega$ al igual que el Modelo $k-\varepsilon$ también integra dentro del sistema de ecuaciones del fluido dos ecuaciones, siendo en este caso la de la energía cinética turbulenta y la de la disipación específica ω para calcular el valor de la viscosidad turbulenta:

$$\mu_t = \bar{\rho} * \frac{k}{\omega}$$

Ec. XXIV

Otro modelo también utilizado es el denominado Modelo RNG $k-\varepsilon$. No obstante, este modelo al igual que el $k-\omega$ son más utilizados en caso concretos de turbulencia, dado que, por su elevada robustez, estabilidad y bajo coste computacional el más ampliamente utilizado es el Modelo $k-\varepsilon$.

- Método de más ecuaciones:

Este tipo de métodos son mucho más complejos que los de dos ecuaciones. Dentro de ellos destaca el Modelo de las Tensiones de Reynolds (RSM), dentro del cual se utilizan siete ecuaciones adicionales para el cálculo de μ_t lo cual implica un elevado coste computacional. Mediante este modelo se plantea la resolución de las ecuaciones del transporte para todas las tensiones de Reynolds.

Este tipo de modelo se encuentra actualmente en investigación ya que todavía no está claro que modelo es el mejor para cada clase de flujo por la necesidad de resolver un gran número de ecuaciones que puede producir errores numéricos excesivamente grandes.

- **Modelo DES y DNS**

Estos dos modelos son variaciones de los modelos RANS y LES comentados anteriormente, de esta forma, en primer lugar, el modelo DES (Detached Eddy Simulation) se basa en una combinación de las ventajas de los modelos RANS y LES. de forma que aprovecha la eficiencia del modelo RANS cerca de la frontera de contorno y la eficiencia del modelo LES en regiones alejadas de la frontera de contorno. Para ello el procedimiento que usa este modelo es cambiar la longitud de escala dw por una nueva longitud de escala \tilde{l} que obtiene el valor de:

$$\tilde{l} = \text{mín}(dw, C_{DES}\Delta)$$

Ec. XXV

Siendo C_{DES} una constante del modelo DES y Δ el tamaño de la rejilla.

En segundo lugar, el modelo DNS (Direct Numerical Simulation) resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes directamente sin la utilización de valores promedios ni aproximaciones, ofreciendo de esta forma resultados más exactos. Esto también supone por tanto la necesidad de un elevado coste computacional, que en la actualidad hace que este modelo se encuentre muy limitado.

4.3.2.4. Modelos de combustión

Los modelos de combustión utilizados por ANSYS CFX permiten simular los flujos dentro de un proceso de combustión. Los modelos más importantes son el “Eddy Dissipation Model” (EDM), “Finite Rate Chemistry Model” (FRC) y “Flamelet Model”.

El modelo EDM de disipación de remolino se aplica para la simulación de flujos turbulentos en los que las reacciones químicas ocurridas son mucho más rápidas que los procesos de transporte de flujo, de tal forma que no existe un control preciso del proceso de reacción.

En segundo lugar, el modelo FRC se aplica en situaciones en las que el tiempo de reacción química limita la velocidad de dicha reacción. Permite calcular las velocidades de las reacciones ocurridas mediante la interacción molecular de los fluidos sobre los que se da dicha reacción. Existe la posibilidad de combinar los modelos EDM y FRC para llamas donde las velocidades de reacción química pueden ser lentas en comparación con las velocidades de mezcla de reactivo, no obstante, tanto el modelo combinado como el modelo FRC son menos precisos que el modelo EDM.

Por último, se encuentra el modelo de flámulas (*Flamelet Model*) utilizado para el cálculo de llamas de difusión y que permite obtener información sobre especies menores y radicales como CO y OH y de las fluctuaciones turbulentas en la temperatura y la extinción local a altas velocidades de disipación escalar.

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

Otros modelos también utilizados y asociados al modelo de flámculas que se acaba de describir son el "*Burning Velocity Model*" y el "*Extended Coherent Flame Model*". Estos modelos se usan para modelar la propagación de llamas premezcladas y parcialmente premezcladas respectivamente. Así el BVM se basa en una correlación algebraica para modelar la velocidad de propagación de la llama en flujo turbulento, mientras que el ECFM modela la velocidad de combustión turbulenta resolviendo de forma adicional una ecuación adicional para la densidad de la superficie de la llama.

4.4. Conclusiones

En este capítulo se han explicado los recursos necesarios para llevar a cabo de simulación, siendo estos, por un lado, los datos experimentales obtenidos del motor experimental Waukesha CFR que es analizado en un estudio experimental llevado a cabo por otros autores. A partir de estos datos experimentales se define tanto la geometría del motor como sus condiciones de funcionamiento. Además de este mismo estudio experimental se obtienen, como más adelante se mostrarán, las gráficas de las emisiones obtenidas del ensayo experimental que servirán para la validación del modelo CFD.

Por otro lado, el segundo recurso utilizado se corresponde con los programas de simulación necesarios para el diseño del modelo CFD, entre los que se diferencian el programa Inventor dedicado para el modelado 3D de la geometría utilizada para la simulación y el programa ANSYS CFX utilizado para la simulación del proceso de combustión. De este último programa se han explicado sus métodos de cálculo basados en la aproximación a las ecuaciones de Navier-Stokes mediante la discretización por volúmenes finitos y las principales ecuaciones y métodos que utiliza para resolver los problemas fluidodinámicos que abarca.

A partir de la información acumulada tanto de los capítulos dedicados a la compresión de los motores HCCI, como del conocimiento de los datos experimentales y los programas de simulación utilizados, se puede avanzar a la simulación del proceso de combustión HCCI y a la obtención de los resultados basados en los valores de emisiones que en esta se producen.

5. Simulación CFD y resultados

5.1. Descripción de la simulación realizada

En este capítulo el objetivo será, por un lado, describir el procedimiento seguido, así como los modelos utilizados para la simulación y porqué, para llevar a cabo el análisis de las emisiones producidas en el proceso de combustión que este trabajo de fin de grado abarca, y por otro lado analizar los resultados obtenidos, validándolos con los datos experimentales de los que se dispone.

Para realizar esta simulación, es necesario entender que para simular un proceso de combustión de forma precisa es necesario modelar la propagación de la llama de combustión conociendo aspectos como la velocidad de reacción o la concentración de productos asociados al combustible y comburente utilizados. En un proceso de combustión tipo HCCI la cinética del proceso controla la propia combustión, por lo que un aspecto clave a controlar es la cinética de reacción. Este factor también representa una importancia elevada respecto a la quema de la mezcla de combustible y oxidante, dado que, si la reacción es demasiado lenta, la quema de la mezcla no tendrá lugar y si es demasiado rápida se producirán fenómenos de detonación. Por tanto, la simulación de un proceso de combustión, en este caso el acontecido en un motor HCCI, resulta un proceso complejo en el que intervienen múltiples factores ligados a la cinética, la química y la física del proceso. Por esta razón, la simulación que se describe a continuación presenta una serie de simplificaciones que sirven para conseguir, desde una base básica en el mundo de la simulación CFD, simular la combustión y con ello las emisiones de un motor HCCI, de forma que sirva tanto para introducirse y aumentar el conocimiento de las herramientas de simulación CFD, y más concretamente de la herramienta ANSYS CFX, como para conseguir justificar los reducidos valores de emisiones que se les atribuyen a los motores HCCI.

De esta manera el procedimiento seguido comienza, en primer lugar, con la descripción de los principales modelos utilizados en la simulación. A partir de ello, el procedimiento sigue con la definición de las simplificaciones y las condiciones de contorno que definen el proceso de combustión simulado.

5.1.1. Modelos utilizados

El modelo de combustión utilizado para este análisis ha sido el *"Finite Rate Chemistry Model"*, el cual se caracteriza por ser utilizado en reacciones donde la escala de tiempo de la mezcla limita la velocidad de reacción. Otros posibles modelos de combustión aplicables serían el *"Eddy Dissipation Model"* y el *"Combined EDM/Finite Rate Chemistry Model"*. Ambos modelos permiten también el cálculo de reacciones de flujo turbulento, siendo el primero muy utilizado por su menor complejidad de uso y un mayor rendimiento para la simulación de flujos turbulentos donde la velocidad de la reacción química es rápida en relación con los procesos de transporte en el flujo tanto para llamas premezcladas como de difusión, y el segundo aplicable reacciones limitadas por la mezcla turbulenta y la cinética, de forma que la resolución se lleva a cabo calculando las velocidades de reacción para cada modelo para posteriormente utilizar el mínimo del resultado obtenido por ambos modelos. No obstante, dado que los resultados más fiables se han obtenido con el *"Finite Rate Chemistry Model"*, con el cual se reproducen mejor los modelos de combustión dominados por la cinética química del proceso, tal y como ocurre en los motores HCCI, ha sido este el modelo elegido en la simulación realizada en este trabajo de fin de grado.

Por otra parte, el modelo de turbulencia utilizado ha sido el Modelo $k-\epsilon$, el cual es el más generalizado debido a su gran estabilidad y su elevada fiabilidad respecto a los resultados obtenidos con bajos costes computacionales. Es importante añadir, que su desventaja principal se encuentra en que es inestable con bajos números de Reynolds.

De forma adicional también se ha hecho uso de un modelo de radiación denominado *"P1 model"*, el cual es utilizado por la bibliografía en ejemplos de estudio de procesos de combustión con metano como combustible y es necesario para conseguir unos resultados más precisos, de forma que se simula también la transmisión de calor en el cilindro.

A partir de los modelos principales que definen el cálculo del proceso de combustión, es necesario exponer cuales han sido las simplificaciones consideradas en la simulación, las cuales, al igual que las condiciones de contorno impuestas, también condicionan los resultados obtenidos.

5.1.2. Simplificaciones consideradas

Como se ha explicado, dentro de este trabajo la simulación llevada a cabo sirve como introducción a las herramientas CFD, de forma que para llevarla a cabo es necesario partir de diversas simplificaciones con las que se pretende analizar las reducidas emisiones que se les atribuyen como ventaja a los motores HCCI.

Las simplificaciones justificadas y sus efectos se detallan a continuación:

- **Simulación del instante de combustión del proceso de combustión:** En esta simulación se omiten los procesos de compresión y expansión de la mezcla, así como, la apertura y cierre de válvulas. Esta simplificación implica que la geometría utilizada en la simulación corresponde con el volumen correspondiente al conjunto cilindro-cámara de combustión en el instante de la combustión.

Tal y como expresa Jose Antonio Vélez Godiño en su tesis doctoral enfocada en la “Contribución a la Simulación de la Combustión HCCI en Motores de Combustión Interna Alternativos mediante Modelos Multizona”, “Las características de mezcla homogénea y autoignición sin frente de llama de la combustión en modo HCCI anteriormente referidas posibilitan que ésta tenga lugar de una forma rápida, con una pequeña variación del volumen de la cámara, lo que aproxima la combustión en modo HCCI a un proceso de aportación de calor a volumen constante.” Esto ha permitido considerar que la combustión se lleva a cabo a un determinado volumen fijo que se obtiene a partir del ángulo de cigüeñal en el que se da la combustión.

Esta simplificación es la que más afectará a los resultados obtenidos en tanto que el proceso de combustión se simulará realmente como un proceso de transmisión de calor a volumen constante.

- **El proceso de renovación de la carga se lleva a cabo en ciclo cerrado:** Este sistema de renovación de la carga (similar a los motores de dos tiempos gasolina) puede provocar interferencias entre los orificios de admisión y escape. Este efecto ya es considerado por ANSYS durante la simulación, de forma que no permite que se produzcan flujos en la dirección contraria marcada por la condición de contorno (*inlet/outlet*) que se le impone al orificio de admisión o escape.
- **Formación de la mezcla:** Una característica importante de la combustión en un motor HCCI es la formación de una mezcla homogénea para evitar la formación de hollín. En este caso el combustible inyectado es metano en estado gaseoso lo cual facilita que la mezcla de combustible y aire sea homogénea.
- **Fenómeno de la turbulencia:** Dado que no se disponen de datos respecto a la turbulencia que presenta el aire a la entrada de la admisión, este parámetro, que sobretodo afecta al mejor reparto y mezcla del aire dentro de la cámara, no se ha tenido en cuenta.

Para la completar la definición de la simulación llevada a cabo, es necesario especificar cuáles son las principales condiciones de contorno que se utilizan para que ANSYS CFX reproduzca de la forma más precisa las emisiones en las condiciones en las que se obtienen en el ensayo experimental.

5.1.3. Condiciones de contorno de la simulación CFD

Las principales condiciones de contorno que definen la simulación CFD del proceso de combustión son las siguientes:

- 1) **Chemical Timescale:** El valor de este parámetro influye en la combustión como modelo de predicción local de la extinción de dicha combustión.

La variación de este parámetro permite influir en el pico de presión y temperatura alcanzado durante la combustión, afectando por tanto también al valor de las emisiones producidas.

Su valor por defecto es de 0,000137, no obstante, a partir de los resultados obtenidos, así como de la información obtenida en el trabajo final de carrera llevado a cabo por (Jorge Trobajo, 2011), en el que elige un valor de 0,0137 haciendo uso de la herramienta ANSYS CFX, se ha modificado a un valor de 0,00137, con el cual se han conseguido unos resultados más precisos.

- 2) **Temperatura y presión de inicio:** Ambos parámetros son de gran importancia para conseguir que el proceso simulado se ajuste al experimental. No obstante, al utilizar como modelo de combustión el "*Finite Rate Chemistry Model*", el valor de la temperatura inicial es de gran importancia, pues el funcionamiento de dicho modelo se ve afectado en gran medida por este valor. Desde la bibliografía de ANSYS CFX se expone que resulta necesario, para el correcto funcionamiento de modelo de combustión, fijar una temperatura inicial por encima de los 900 K y que un valor aconsejado sería una temperatura de 1200 K. Además, el valor de la presión inicial, dado que se está simulando la combustión justo en el instante en que esta se produce, se ha fijado en 60 bar que es el valor de la presión en el inicio de la combustión para el caso 1 de estudio.
- 3) **Mallado de la geometría:** La calidad de la malla generada es uno de los factores de mayor importancia en la simulación, pues una malla de muy mala calidad otorga unos datos muy poco fiables, mientras que una malla de muy buena calidad aporta resultados precisos a cambio de un elevado coste de capacidad de cálculo del ordenador.

Para la simulación realizada se ha utilizado una malla con 144.974 elementos y 28.047 nodos. El uso de esta calidad de malla ha sido fijado a través de múltiples ensayos en los que con peores calidades de malla aportaban resultados muy inexactos o incluso afectaban al funcionamiento del propio modelo de combustión, y calidades de malla más elevadas provocaban un fallo en la simulación debido a la limitada capacidad de cálculo del ordenador.

Por tanto, la calidad de la malla ha sido un factor muy considerado en este trabajo en tanto que ha estado también limitada por la capacidad de cálculo del ordenador.

- 4) **Datos experimentales para el caso 1:** Los datos experimentales expuestos anteriormente sirven también para definir las condiciones de contorno de entrada de aire y combustible o de la geometría utilizada para realizar el análisis con la cual se define también la relación de compresión.

5.1.4. Simulaciones realizadas

Como se ha dicho el modelo de combustión utilizado ha sido el “*Finite Rate Chemistry Model*”, el funcionamiento del cual se ve afectado principalmente por el valor de la temperatura inicial con la que se produce la combustión, utilizada para indicar las condiciones de inicio de la simulación realizada. Es por esta razón, por la cual dentro del objetivo de simular el caso 1 de estudio se ha estudiado además el efecto que tiene el valor de la temperatura inicial en los resultados obtenidos, de forma que este factor sirva para calibrar el modelo CFD diseñado y para determinar con qué valor de temperatura inicial se obtienen los resultados más precisos.

De esta forma, se han realizado seis simulaciones con temperaturas iniciales de 700 K, 800 K, 900 K, 1000 K, 1100 K y 1200 K, de tal manera que el modelo CFD se calibrará utilizando tanto temperaturas que se encuentran por debajo de los valores aconsejados por la bibliografía, como con valores por encima de 900 K. Para todas estas simulaciones se han utilizado como valores constantes una chemical timescale de 0,00137 s, una presión inicial de 60 bar obtenida de la gráfica de presión expuesta en el estudio experimental y que se puede observar en la **Figura 9**, además de los valores de los datos experimentales para el caso 1 que se han comentado en el apartado **4.2.1**. Además, un valor importante es el instante en el que tiene lugar la combustión (aproximadamente en el ángulo de giro del cigüeñal de -5°), ya que como se ha dicho la simulación se realiza en un volumen constante y por tanto para dicho instante la geometría utilizada es la que se muestra en la **Figura 8**:

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

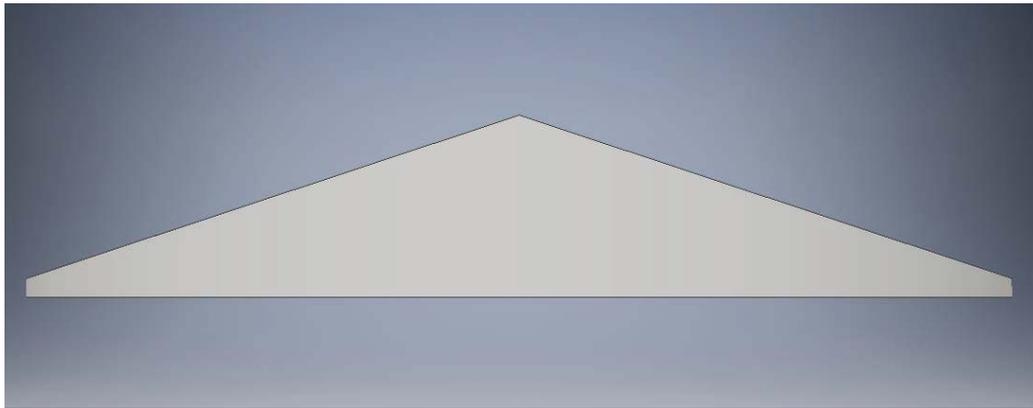


Figura 8 Geometría utilizada en la simulación.

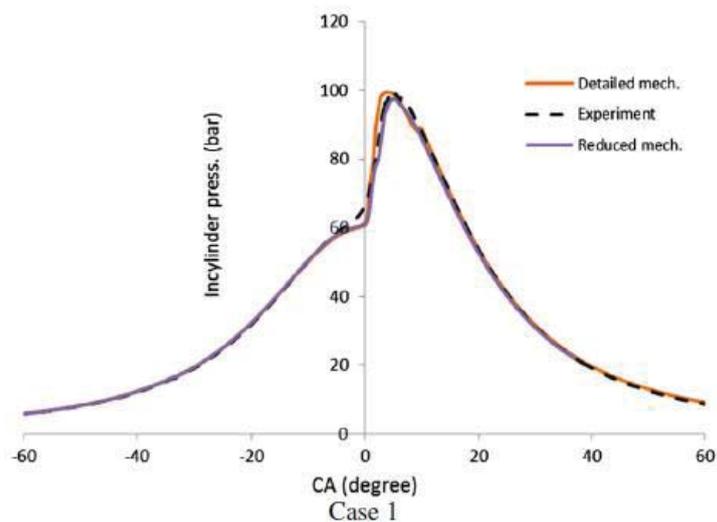


Figura 9 Gráfica de presión para el caso 1 de estudio.
Fuente: (Poorghasemi & otros, 2016)

Una vez definidas las condiciones en las que tiene lugar la combustión (simplificaciones y condiciones de contorno consideradas), así como las simulaciones que se van a realizar a diferentes temperaturas con el objetivo de calibrar el modelo diseñado, se procede a exponer los resultados obtenidos con cada una de estas simulaciones para su análisis y validación.

5.2. Resultados

Partiendo de las condiciones anteriormente descritas para el diseño del modelo CFD (modelos de simulación utilizados, condiciones de contorno, simplificaciones consideradas y valores de los parámetros más influyentes), se lleva a cabo la simulación del proceso de combustión mediante la herramienta ANSYS CFX.

Así, la exactitud de los resultados obtenidos se comprobará comparándolos con los resultados experimentales de los que se dispone y que se presentan a continuación, lo cual conlleva un proceso de validación del modelo para conseguir los resultados más precisos posibles teniendo en cuenta los efectos en la simulación de las simplificaciones acometidas.

5.2.1. Datos de emisiones para validación

Así, para poder validar el modelo CFD diseñado debemos partir de los datos experimentales aportados por el propio artículo de investigación consultado de las emisiones producidas durante la combustión. De esta manera, los datos de interés serán los de las emisiones de CO, NO_x y CO₂:

- Emisiones de monóxido de carbono (CO):

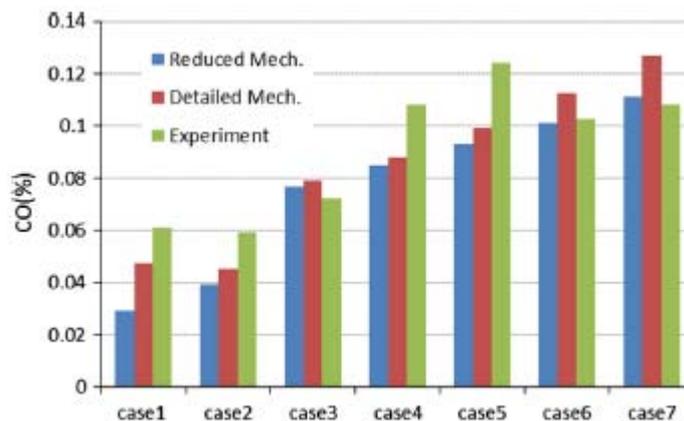


Figura 10 Gráfica de emisiones de CO para los diferentes casos de estudio.
Fuente: (Poorghasemi & otros, 2016)

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

• Emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x):

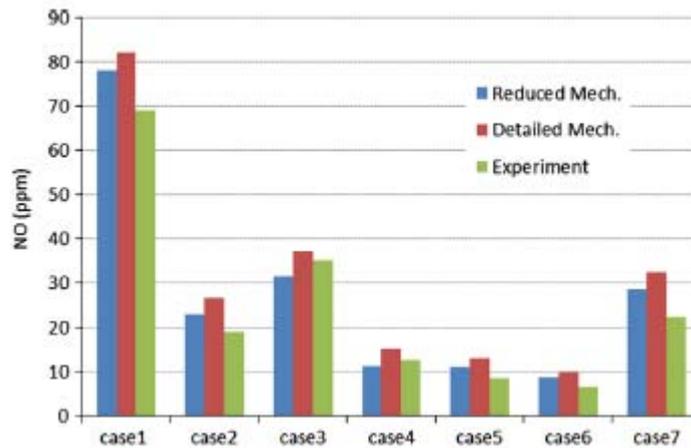


Figura 11 Gráfica de emisiones de NO_x para los diferentes casos de estudio.
Fuente: (Poorghasemi & otros, 2016)

• Emisiones de dióxido de carbono (CO_2):

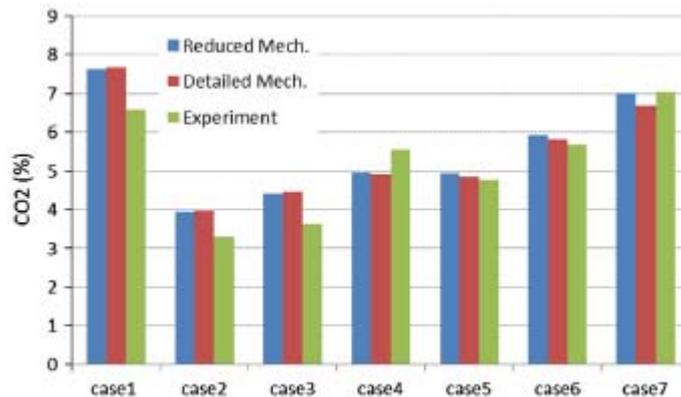


Figura 12 Gráfica de emisiones de CO_2 para los diferentes casos de estudio.
Fuente: (Poorghasemi & otros, 2016)

Como se observa en las gráficas anteriores, el valor de las emisiones se mide por un lado en porcentaje (fracción de la emisión analizada dentro del flujo total por el escape) para el monóxido y el dióxido de carbono, y por otro lado en ppm (partículas por millón) para las emisiones de óxidos de nitrógeno. De esta manera, para el caso 1 (caso de estudio para este trabajo final de grado), los valores de emisiones obtenidos son:

- CO (%) = 0,061 %
- CO_2 (%) = 6,6 %
- NO_x (ppm) = 68 ppm

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

Tal y como se observa, en las gráficas mostradas anteriormente sobre la cantidad de cada emisión en los gases de escape, se pueden distinguir tres valores diferentes para cada caso de estudio. Estos tres valores se corresponden con según que mecanismo se ha usado para el análisis del proceso de combustión HCCI, ya sea mediante el ensayo experimental del motor, un mecanismo detallado (*Detailed Mechanism*) o un mecanismo reducido (*Reduced Mechanism*), desarrollado por los propios autores para realizar el análisis propuesto. Son los datos obtenidos mediante el ensayo experimental los que se van a utilizar como dato para la validación del modelo.

Así, tanto con el mecanismo detallado, como con el mecanismo reducido (mecanismos de simulación sin simplificar o simplificando las reacciones que tienen lugar) se obtienen valores que difieren del ensayo experimental. Esto hace indicar la dificultad que conlleva simular de forma precisa un proceso de combustión, ya que aun con el mecanismo detallado que cuenta con 53 especies y 325 reacciones simuladas con programas de cálculo cinético-químico como Chemkin, los resultados simulados difieren siempre en mayor o menor medida de los experimentales.

Con todo lo comentado, se procede ahora a mostrar los resultados de las simulaciones realizadas y su validación con los datos experimentales.

5.2.2. Análisis y validación de resultados

Mediante el uso de los datos anteriores, se pueden ahora validar los resultados obtenidos de las emisiones simuladas para temperaturas de 700 K, 800 K, 900 K, 1000 K, 1100 K y 1200 K. Tal y como se observa, las tres primeras temperaturas están por debajo de los valores aconsejados por la bibliografía, no obstante, su uso ha aportado buenos resultados además de servir para determinar de forma más precisa como afecta esta variación de temperatura al valor de las emisiones producidas.

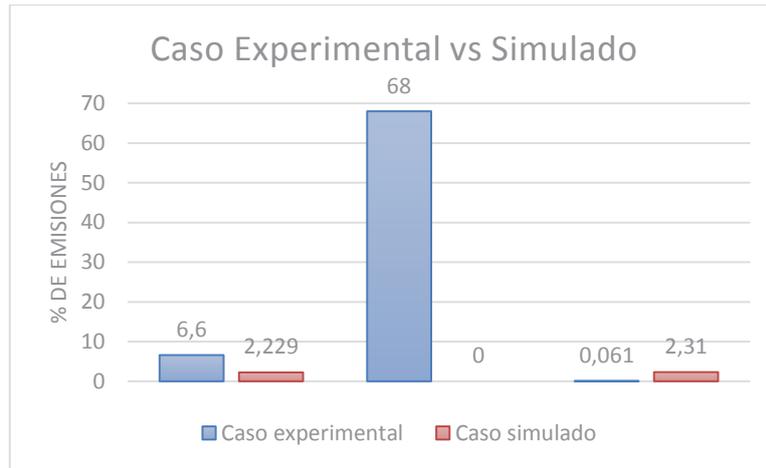
De esta forma, se muestran a continuación, para cada temperatura, el valor de las emisiones obtenidas comparado con los valores experimentales:

- **Caso 1.1 ($T_{ini}= 700$ K):**

Emisiones	CO ₂ (%)	NO _x (ppm)	CO (%)
Caso experimental	6,6	68	0,061
Caso simulado	2,229	0.39066	2,31

Tabla 4 Comparación de resultados de la simulación CFD con el análisis experimental para el caso 1.1.

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

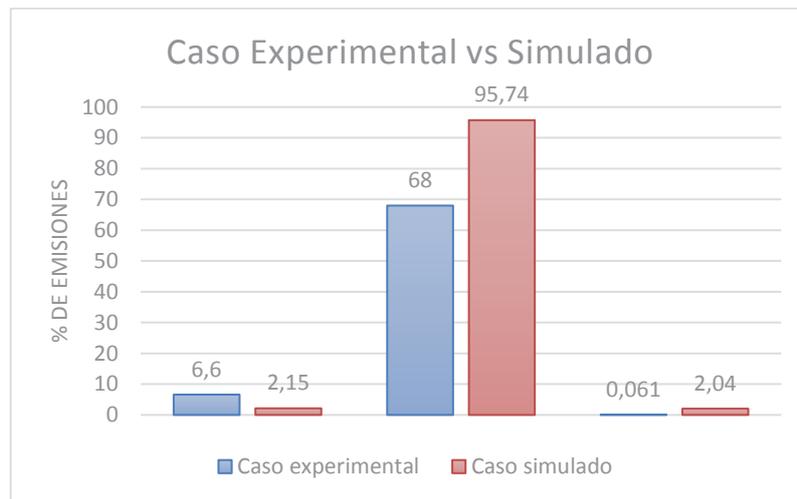


Gráfica 2 Ensayo experimental vs simulado de cada emisión (CO₂, NO_x y CO) para el caso 1.1.

- **Caso 1.2 (T_{ini}= 800 K):**

Emisiones	CO ₂ (%)	NO _x (ppm)	CO (%)
Caso experimental	6,6	68	0,061
Caso simulado	2,15	95,74	2,04

Tabla 5 Comparación de resultados de la simulación CFD con el análisis experimental para el caso 1.2.



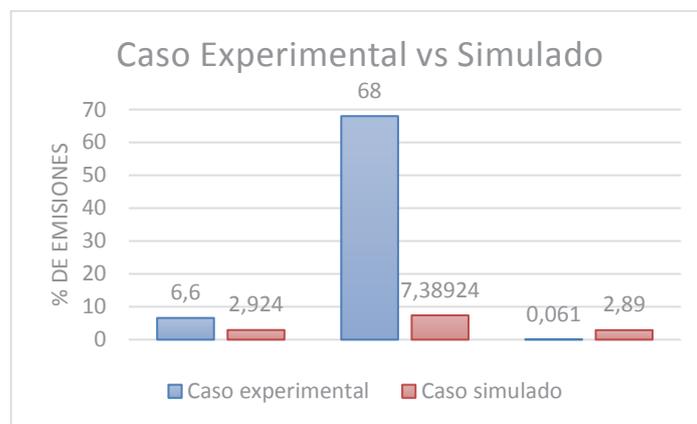
Gráfica 3 Ensayo experimental vs simulado de cada emisión (CO₂, NO_x y CO) para el caso 1.2.

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

- **Caso 1.3 ($T_{ini} = 900 \text{ K}$):**

Emisiones	CO ₂ (%)	NO _x (ppm)	CO (%)
Caso experimental	6,6	68	0,061
Caso simulado	2,924	7,38924	2,89

Tabla 6 Comparación de resultados de la simulación CFD con el análisis experimental para el caso 1.3.



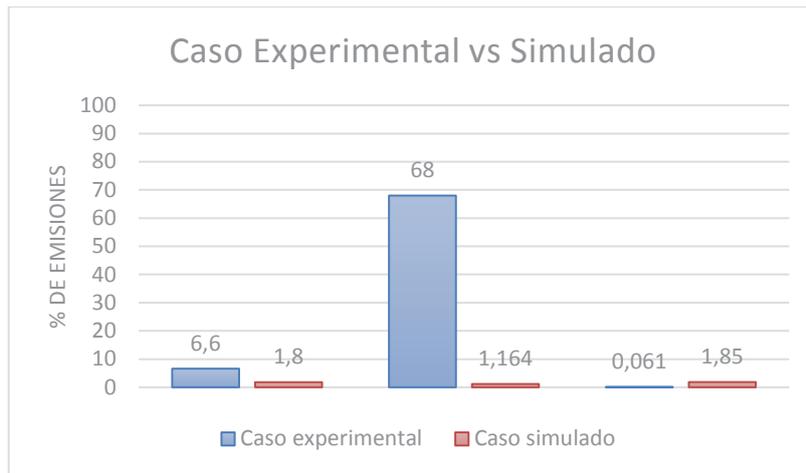
Gráfica 4 Ensayo experimental vs simulado de cada emisión (CO₂, NO_x y CO) para el caso 1.3.

- **Caso 1.4 ($T_{ini} = 1000 \text{ K}$):**

Emisiones	CO ₂ (%)	NO _x (ppm)	CO (%)
Caso experimental	6,6	68	0,061
Caso simulado	1,8	1,164	1,85

Tabla 7 Comparación de resultados de la simulación CFD con el análisis experimental para el caso 1.4.

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

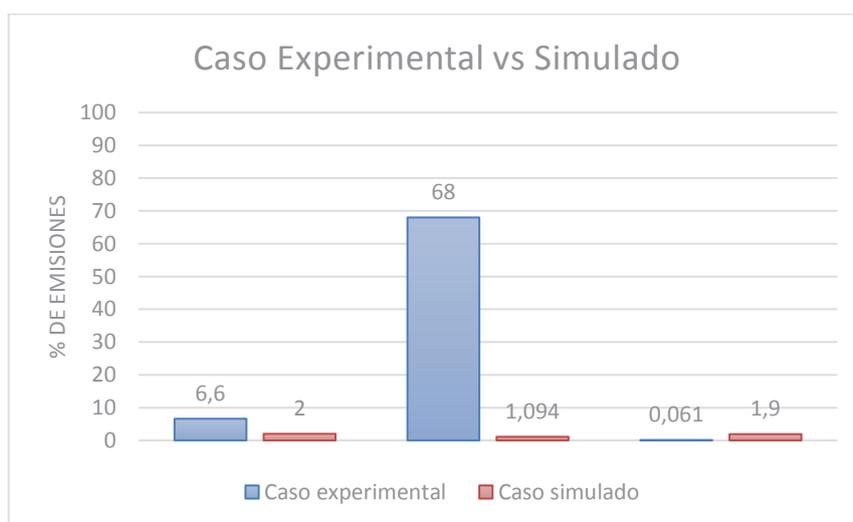


Gráfica 5 Ensayo experimental vs simulado de cada emisión (CO₂, NO_x y CO) para el caso 1.4.

- **Caso 1.5 (T_{ini}= 1100 K):**

Emisiones	CO ₂ (%)	NO _x (ppm)	CO (%)
Caso experimental	6,6	68	0,061
Caso simulado	2	1,094	1,9

Tabla 8 Comparación de resultados de la simulación CFD con el análisis experimental para el caso 1.5.



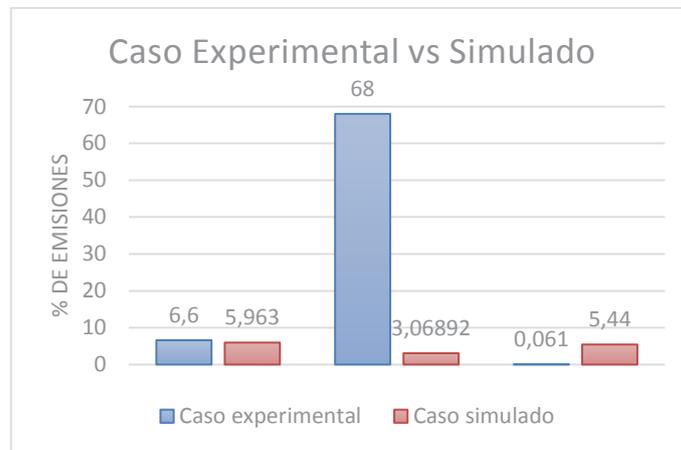
Gráfica 6 Ensayo experimental vs simulado de cada emisión (CO₂, NO_x y CO) para el caso 1.5.

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

- **Caso 1.6 ($T_{ini}= 1200\text{ K}$):**

Emisiones	CO ₂ (%)	NO _x (ppm)	CO (%)
Caso experimental	6,6	68	0,061
Caso simulado	5,963	3,06892	5,44

Tabla 9 Comparación de resultados de la simulación CFD con el análisis experimental para el caso 1.3.



Gráfica 7 Ensayo experimental vs simulado de cada emisión (CO₂, NO_x y CO) para el caso 1.3.

Para los seis casos simulados se ha llevado a cabo su validación con los resultados experimentales y con ello se observa cómo, de forma genérica, para todas las simulaciones la emisión que mejor se reproduce es la de dióxido de carbono, mientras que las emisiones de óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono resultan más difíciles de simular con precisión.

Así, en primer lugar, para las emisiones de óxidos de nitrógeno, la simulación que mejor reproduce es la que se lleva a cabo con una temperatura inicial de 800 K. En esta simulación se alcanzan un valor 95,78 ppm, el cual difiere en gran medida con los valores obtenidos por el resto de las simulaciones, donde las ppm de NO_x son mucho más bajas que en el caso experimental. De esta forma, para el caso 1.2 (800 K) el valor de emisión simulado se acerca bastante a los valores obtenidos tanto experimentalmente como a las simulaciones realizadas mediante el “*Reduced mechanism*” y el “*Detailed mechanism*” utilizados en el artículo de investigación, lo cual hace indicar que el modelo CFD para este caso de simulación reproduce con elevada precisión los valores de emisiones NO_x producidos en la combustión teniendo en cuenta las simplificaciones realizadas. También destaca en este aspecto la poca precisión de la simulación para el caso 1.1 con temperatura inicial de 700 K, donde el valor de 0,39066 ppm es tan reducido (un valor próximo a 0) y difiere en gran medida tanto de los valores experimentales como los respectivos a la simulación para 800 K.

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

En segundo lugar, las emisiones de CO₂, tal y como se ha comentado y expuesto gráficamente, son las que mejor se reproducen por todas las simulaciones, dado que el valor experimental de validación es de un 6,6% y el valor mínimo de porcentaje de emisiones de dióxido de carbono alcanzado con las simulaciones es de un 1,8%. Así, la simulación que mejor reproduce estas emisiones es la del caso 1.6 (5,963%), para la que la temperatura inicial es de 1200 K, mientras que para el resto de las simulaciones los valores se encuentran alrededor del 2-3%, unos valores que se pueden considerar aceptables y bastante precisos. Por ejemplo, en el caso 1.2, en el que se reproducen de forma más precisa las emisiones de óxidos de nitrógeno, se obtienen un 2.15% de emisiones de dióxido de carbono, un valor que dadas las simplificaciones consideradas se puede considerar correcto ya que no difiere en gran medida del valor experimental.

Por último, respecto a las emisiones de monóxido de carbono, estas han sido las más difíciles de reproducir y los valores obtenidos con las simulaciones se han alejado en gran medida de los experimentales, lo cual indica que ha sido en la predicción de estas emisiones en las que más han afectado las simplificaciones realizadas. Si se observan las tablas y gráficas expuestas para cada caso, se obtiene que los menores valores de emisiones de CO se dan para los casos 1.2, 1.4 y 1.5, para los que los porcentajes de estas emisiones oscilan entre un 1,8% y un 2%, valores aun así muy alejados del 0,061% obtenido mediante el ensayo experimental.

Por todo lo comentado, a partir de la validación realizada y su análisis, se obtiene como resultado que en el modelo CFD diseñado, los valores de las emisiones de monóxido de carbono no se reproducen bien y existen diferencias importantes entre los valores simulados y los experimentales. No obstante, las emisiones tanto de dióxido de carbono como de óxidos de nitrógeno se reproducen con elevada precisión, sobretodo en el caso 1.2 donde la temperatura inicial es de 800 K y de forma conjunta, es decir, tanto los valores de NO_x como de CO₂, son simulados con buena precisión. Es por ello por lo que se considera que, partiendo de las simplificaciones realizadas, se puede considerar que el modelo CFD diseñado es eficiente para la predicción de emisiones de NO_x y CO₂ principalmente en el caso 1.2, por lo que a partir de la calibración (a través del uso de diferentes temperaturas iniciales de la combustión) y validación del modelo resulta que, el modelo que mejor reproduce los resultados experimentales es en el que la temperatura inicial es de 800 K.

Así, para el modelo del caso 1.2, elegido como modelo más eficiente en la predicción de emisiones, se exponen a continuación, de forma gráfica, las fracciones másicas de cada emisión en el interior del volumen de control, en la etapa final de esta:

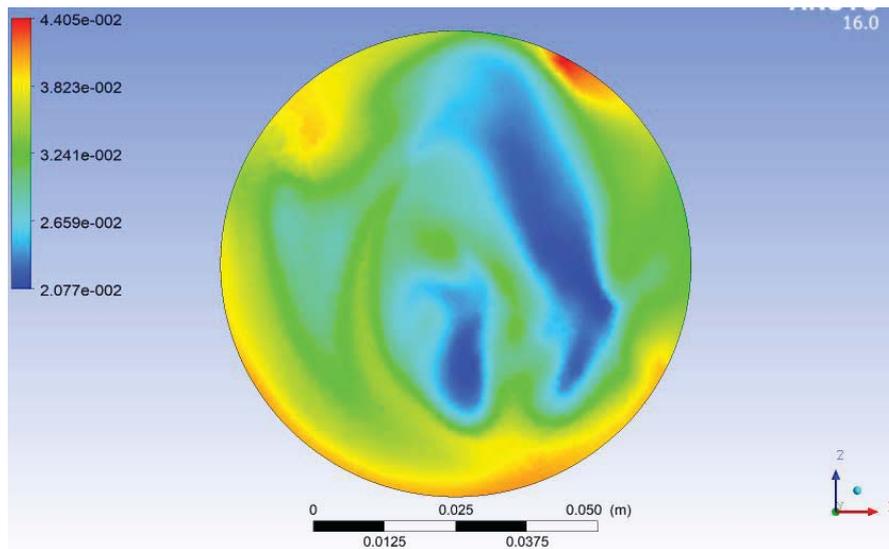


Figura 13 Fracción másica de CO_2 para el caso 1.2 de análisis.

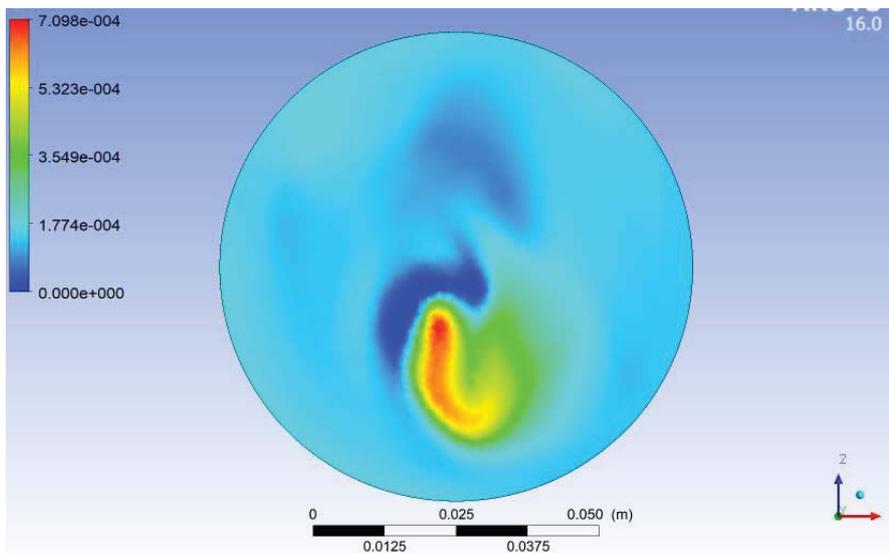


Figura 14 Fracción másica de NO_x para el caso 1.2 de análisis.

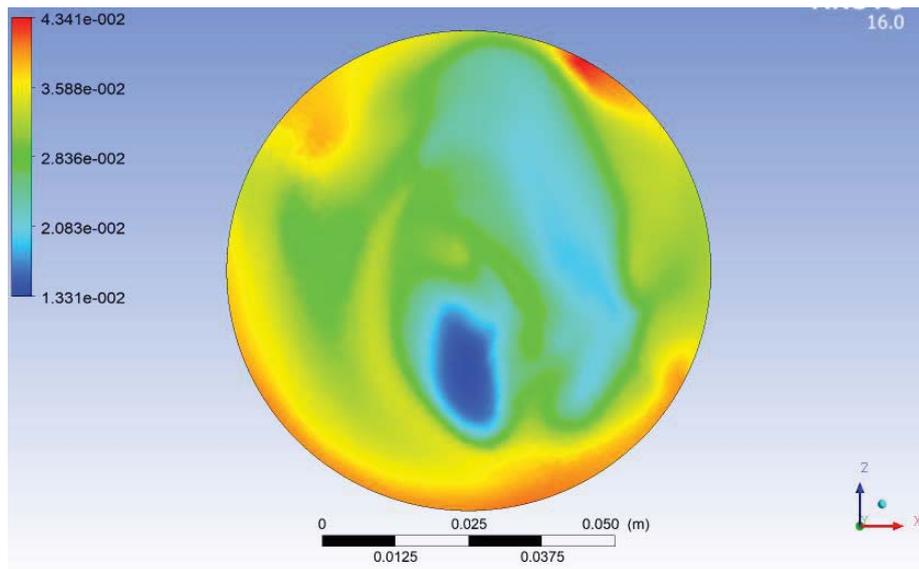


Figura 15 Fracción másica de CO para el caso 1.2 de análisis.

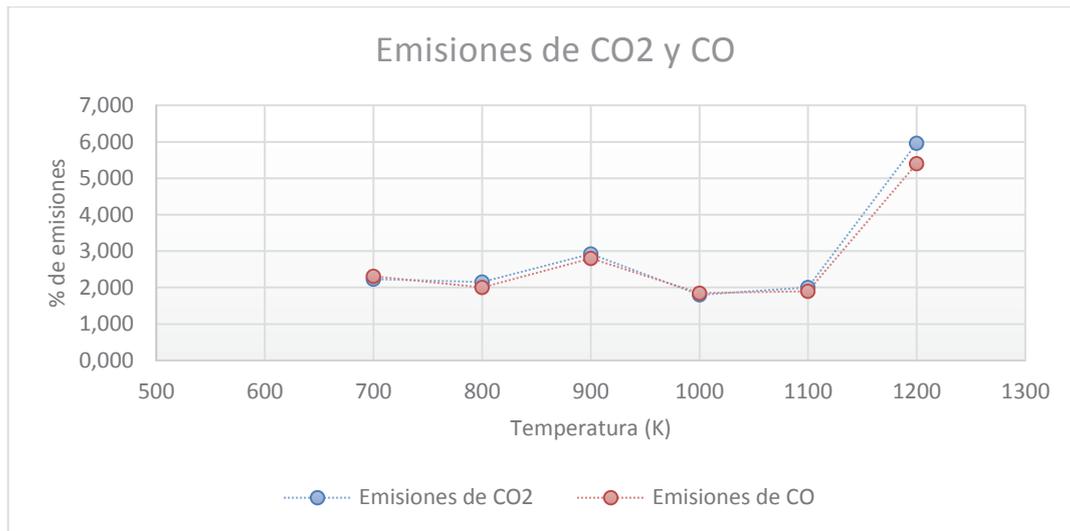
5.3. Observaciones finales

Una vez analizados y validados los resultados de las simulaciones llevadas a cabo, así como calibrado el modelo diseñado, se pueden realizar dos observaciones importantes.

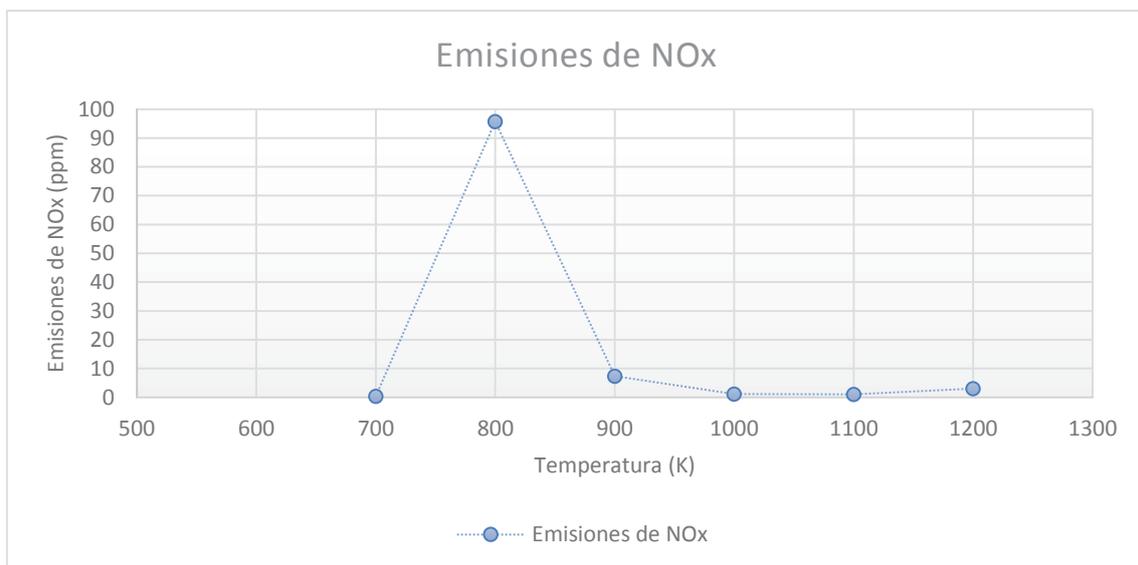
En primer lugar, tal y como se ha comentado tras la comparación de los resultados de cada simulación con los resultados experimentales, el modelo CFD calibrado para la simulación de las emisiones, que es el referente al caso 1.2 donde se utiliza una temperatura inicial de 800 K, se considera correcto, dado que, tanto las emisiones de CO₂ como las emisiones de NO_x se reproducen con elevada exactitud, aunque las emisiones de CO difieren en gran medida de los valores experimentales. Esto resalta por tanto el efecto de las simplificaciones llevadas a cabo y la dificultad en la simulación de un proceso de combustión y sobretodo, en este caso, de la simulación de las emisiones de monóxido de carbono. No obstante, dado que esta simulación sirve de introducción al CFD y a las complejas condiciones y factores que son necesarios considerar para conseguir reproducir de forma precisa (nunca igual a la realidad dado que las simulaciones no son ensayos experimentales y siempre tendrán un error correspondiente a la propia herramienta utilizada) los resultados experimentales, podemos decir que con esta simulación se ha conseguido el objetivo prefijado de analizar las reducidas emisiones correspondientes a los motores HCCI.

En segundo lugar, se han realizado seis simulaciones del mismo proceso de combustión variando únicamente la temperatura inicial con la que se produce la combustión (como ya se ha comentado dentro del *"Finite Rate Chemistry Model"* la temperatura inicial es uno de los factores más importantes en el funcionamiento del modelo). A partir de los resultados obtenidos, se puede observar en la **Gráfica 8** y la **Gráfica 9** como a medida que se aumenta la temperatura los valores de las emisiones de CO₂ y CO se mantienen constantes con valores entre el 2% y 3% hasta el valor de temperatura de 1100 K, y aumentan de forma considerable al utilizar un valor de 1200 K, mientras que las emisiones de NO_x tienen un comportamiento diferente, en tanto que estas se mantienen con valores de entre 0 y 10 ppm, salvo en el caso 1.2 con una temperatura de 800 K, donde se produce un pico debido a una mayor producción de NO_x. Por tanto, aunque el aumento de temperatura es lineal de menor a mayor, el funcionamiento del modelo no imita esta tendencia en los valores de emisiones producidas, sino que es solo para una cierta temperatura con la que cada emisión es reproducida de forma más precisa. Además, se observa como la tendencia de las emisiones de CO₂ y CO es muy similar, dando como resultado unas elevadas emisiones de CO, muy superiores al valor buscado.

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión



Gráfica 8 Tendencia de producción de emisiones de CO₂ y CO conforme varía la temperatura.



Gráfica 9 Tendencia de producción de emisiones de NO_x conforme varía la temperatura.

6. Conclusiones y expectativas de futuro

En este trabajo de fin de grado el objetivo es analizar las características de los motores HCCI, que como ha quedado demostrado, constituyen unas de las posibilidades más eficientes y ventajosas para la substitución de los cada vez más limitados (en cuanto a emisiones) motores térmicos convencionales. Este objetivo ha estado motivado por la creciente necesidad de los motores de automoción por adecuarse a unas limitaciones anticontaminantes más estrictas.

Para conseguir este objetivo se ha llevado a cabo un profundo análisis del funcionamiento y de este tipo de motor, así como, de sus ventajas e inconvenientes en comparación a los principales motores de automoción, además de un análisis detallados de estudios realizados sobre motores HCCI en los que se analiza el efecto de factores como la inyección, las presiones o temperaturas de admisión o el combustible utilizado, y dentro del factor combustible, un análisis de los principales utilizados, los cuales han servido para definir la simulación realizada en el trabajo y justificar las ventajas y características asociadas a los motores HCCI.

La principal ventaja de este motor son sus reducidas emisiones y, por ello, se ha decidido realizar una introducción a la simulación mediante códigos CFD de un proceso de combustión HCCI para analizar sus principales emisiones y demostrar de esta manera la capacidad de este motor para funcionar (a baja carga) con una producción de emisiones muy reducida. Esta simulación ha estado ligada a simplificaciones que han afectado de forma significativa a los valores de las emisiones. No obstante, con la simulación llevada a cabo se han conseguido resultados de elevada precisión además de obtener un conocimiento mucho más abundante tanto de la propia herramienta utilizada en este trabajo como del análisis de procesos de combustión mediante códigos CFD.

Por esta razón, una de las expectativas de futuro que se pueden considerar, sería realizar un estudio más profundo mediante códigos CFD del proceso de combustión en un motor HCCI sin la utilización de las simplificaciones tenidas en cuenta, para poder, de esta manera, obtener un conocimiento más profundo tanto de las herramientas CFD, como del propio proceso de combustión HCCI.

Otra expectativa de futuro interesante sería la de llevar a cabo un ensayo experimental sobre un motor HCCI que permitiera la obtención de datos experimentales propios para así conseguir un mayor conocimiento de las técnicas e instrumentos necesarios para la realización de este tipo de ensayos.

Por último, una posible línea de investigación futura ligada al funcionamiento a altas cargas de este tipo de motores sería la simulación de este proceso de combustión junto con el uso de EGR u otros tipos de combustibles, que permitiera estudiar las soluciones llevadas a cabo para evitar los fenómenos de detonación en estos motores.

7. Bibliografía

Referencias

ANSYS. (2013). *ANSYS CFX-Solver Modeling Guide*.

Ecomotor.es. (2014). Obtenido de <http://www.economista.es/ecomotor/motor/noticias/6225494/11/14/Anadir-etanol-a-un-coche-de-gasolina-aumenta-su-rendimiento-y-eficiencia.html>

Fernández, P. (2018). *ABC*. Obtenido de https://www.abc.es/motor/economia/abci-ventas-coches-electricos-duplican-respecto-pasado-201805041358_noticia.html

Fernando, R., & Garcés, M. (2018). *Km77*. Obtenido de <https://www.km77.com/coches/mazda/tecnica/2017/skyactiv-x/informacion>

Ibañez, P. (2015). *xataka*. Obtenido de <https://www.xataka.com/vehiculos/que-es-euro-6-y-por-que-hara-que-tu-proximo-coche-diesel-sea-el-menos-contaminante-de-la-historia>

Martínez Fondón, J. R. (2017). Obtenido de <https://corrienteelectrica.renault.es/8-datos-nos-muestran-la-evolucion-del-mercado-del-coche-electrico-dia-hoy/>

Pareja, R. (2017). *CARandDRIVER*. Obtenido de <http://www.caranddriver.es/coches/planeta-motor/vehiculos-hibridos-y-electricos-esta-es-la-realidad-del-mercado>

Payri, F., & Desantes, J. M. (2011). *Motores de combustión interna alternativos*. Reverté.

Resolved Analytics. (2017). Obtenido de A Comparison of CFD Software Packages: <https://www.resolvedanalytics.com/theflux/comparing-popular-cfd-software-packages>

Romero, R. (2018). *CEAC*. Obtenido de <https://www.ceac.es/blog/todo-sobre-la-normativa-europea-de-emisiones-de-vehiculos>

Salmoral, E. (2017). *AutoBild*. Obtenido de https://www.autobild.es/reportajes/mazda-skyactiv-x-motor-gasolina-ventajas-diesel-163730?gclid=Cj0KCQjwn-bWBRDGARIsAPS1svuzR-motx8fkze5F_LfdnglyTCHrATYUnMlywt7SUaEEZRybmOk4PMaAnUoEALw_wcB

SHARCNET. Obtenido de <https://www.sharcnet.ca/my/front/>

Soto, L. (2017). *ELMOTOR*. Obtenido de El País: <https://motor.elpais.com/actualidad/mazda-skyactiv-x-motor-gasolina-diesel/>

Zal, P. *Automobile Catalog*. Obtenido de <http://www.automobile-catalog.com/>

Trabajos citados

- Atikol, U., & otros. (2014). *A reduced mechanism for predicting the ignition timing of fuel blend of natural gas and n-heptane in HCCI engine.*
- Canakci, M. (2008). *An experimental estudy for the effects of boost pressure on the performance and exhaust emissions of a DI-HCCI gasoline engine.*
- Caton Jerald, A. (2012). *Effects of opperating parametres on nitrogen oxides emissions for a natural gas fueled homogeneous charged compression ignition engine (HCCI):Resuts from a thermodynamic model with detailed chemistry.*
- Coskun, G., & otros. (2017). *Computational investigation of combustion and emission characteristics of toluene reference fuel (TRF) mixtures in an HCCI engine using stochastic reactor model.*
- Jorge Trobajo, S. M. (2011). *SIMULACIÓN Y ANÁLISIS EXPERIMENTAL SOBRE COMBUSTIÓN Y BALANCES TÉRMICOS EN UN H2-MEP.*
- Maurya Kumar, R., & Akhil, N. (2017). *Comparative study of the simulation ability of vrius recent hydrogen combustion mechanisms in HCCI engines using stochastic reactor model.*
- Poorghasemi, K., & otros. (2016). *3D CFD simulation of a natural gas fueled HCCI engine with employing a reduced mechanism.*
- Reyhanian, M., & Hosseini, V. (2018). *Various effects of reformer gas enrichment on natural-gas, iso-octane and normal-heptane HCCI combustion using artificial inert species method .*
- Ruizhi, S., & otros. (2007). *Effects of compression ratio on the combustion characteristics of a homogeneous charge compression ignition engine.*
- Turkcana, A., & otros. (2018). *Numerical and experimental investigations of the effects of the second injection timing and alcohol-gasoline fuel blends on combustion and emissions of an HCCI-DI engine.*
- Vélez Godiño, J. A. (2015). *Contribución a la Simulación de la Combustión HCCI en Motores de Combustión Interna Alternativos mediante Modelos Multizona.*
- Yousefzadeh, A., & Jahanian, O. (2017). *Using detailed chemical kinetics 3D-CFD model to investigate combustion phase of a CNG-HCCI engine according to control strategy requirements.*

Documento II

PRESUPUESTO

1. Descripción de los presupuestos

1.1. Unidades de obra

El tiempo necesario para el desarrollo del presente Trabajo Final de Grado ha sido de 520h, las cuales se dividen en función de las unidades de obra que a continuación se describen:

- **Estudio de mercado y búsqueda de información:** (30 h) Esta unidad de obra fue la primera en llevarse a cabo para la ejecución de este trabajo. El objetivo fue acumular información referente tanto al propio motor y sus características de funcionamiento, como al tipo de funcionamiento HCCI, indagando para ello en páginas web y bibliografías especializadas, para así entender mejor el contexto en el que se debía desarrollar este trabajo. También se han tenido en cuenta las horas necesarias para la búsqueda de datos experimentales con los que validar el modelo.
- **Modelado y simulación del motor:** (400 h) La unidad de obra correspondiente al modelado y simulación del motor consta de todos aquellos procesos referenciados a la obtención de una geometría 3D precisa del motor a analizar para posteriormente conseguir los datos necesarios en el estudio mediante códigos CFD. Esta unidad de obra se compone de las siguientes fases:
 - **Elaboración del modelo 3D:** (30 h) Como se ha dicho, en primer lugar, se debió diseñar el modelo 3D mediante el uso de Autodesk Inventor Professional 2018. Dentro de esta etapa también se considera la búsqueda de los datos técnicos necesarios para la creación de la geometría, así como las horas empleadas en la creación de diferentes modelos hasta llegar al modelo final.
 - **Simulación fluidodinámica del modelo:** (200 h) Esta etapa ha sido la más costosa por la complejidad del uso del programa ANSYS y más concretamente del módulo ANSYS CFX. Su realización ha conestado en primer lugar de una fase de entendimiento y estudio del propio programa, y en segundo lugar de una fase de realización de múltiples análisis con diferentes modelos 3D con el objetivo de encontrar la solución deseada.
 - **Análisis de resultados:** (160 h) Análisis de los resultados obtenidos y variación de diferentes parámetros influyentes para aproximar dichos resultados a la solución final.
 - **Elaboración de planos:** (10 h) Finalmente, a partir del modelo 3D obtenido se realizaron los planos correspondientes a cada una de las piezas.

- **Realización de memoria y presupuestos:** (90 h) Esta es la unidad de obra correspondiente a la redacción de la memoria, la realización de cálculos y redacción del documento de presupuestos.
- **Gastos complementarios:** Por último, la unidad de obra referente a los gastos complementarios integra todos aquellos gastos de difícil imputación al trabajo realizado como pueden ser los gastos de amortización del ordenador utilizado.

1.2. Calculo del precio de los materiales y herramientas empleadas

- **Licencia de ANSYS 16.0:** Una licencia de ANSYS para uso académico tiene un coste de alquiler anual de 26400 €.
- **Licencia de Autodesk Inventor Professional 2018:** El precio mensual de la licencia del programa Inventor 2018 utilizado en este trabajo de fin de grado se ha obtenido visitando el catálogo disponible en la web oficial de Autodesk y es de 320,65 €/mes.
- **Licencia de Microsoft Office:** La licencia necesaria para el uso de Microsoft Office tiene un coste de 8,8 €/mes. Este es el precio indicado para empresa en la web oficial de Microsoft Office.
- **Amortización del ordenador utilizado:** Para la realización de este trabajo se ha utilizado un ordenador portátil Toshiba Satellite c10-b-100 de 2 GB de RAM y 32 GB de memoria interna cuyo precio se estima en 400 €. Suponiendo una vida útil total de 4 años (48 meses), el precio de amortización del ordenador es de 8,33 €/mes.
- **Material de oficina y reprografía:** El coste del material de oficina utilizado y la impresión de la totalidad del documento se estima en unos 50 €.
- **Ingeniero Industrial en formación:** El salario medio de un Ingeniero Industrial en formación es de 20 €/mes.
- **Consulta y seguimiento del tutor:** El salario medio de un tutor para tareas de consulta y seguimiento es de 30 €/mes.

2. Presupuesto del trabajo

2.1. Cuadros de precios del trabajo

- Cuadro de precios de mano de obra:

Precio de la mano de obra			
Código	U.M.	Descripción	Precio
M.O.1	h	Ingeniero Industrial	20
M.O.2	h	Tutor para consulta y seguimiento	30

- Cuadro de precios de los materiales empleados:

Precio de los materiales			
Código	U.M.	Descripción	Precio
M.1	Ud.	Licencia de ANSYS 16.0	26400
M.2	mes	Licencia de Autodesk Inventor Professional 2018	320,65
M.3	mes	Licencia de Microsoft Office	8,8
M.4	mes	Amortización del ordenador utilizado	8,33
M.5	Ud.	Material de oficina y reprografía	50

Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por compresión

- Cuadro de precios descompuestos:

U.O.1 Estudio de mercado y búsqueda de información					
Código	U.M.	Descripción	Rdto.	Precio	Importe (€)
M.O.1	h	Ingeniero Industrial	30	20	600
M.O.2	h	Tutor para consulta y seguimiento	2	30	60
%	-----	Costes Directos Complementarios	0,02	-----	13,2
%	-----	Costes Indirectos	0,03	-----	19,8
Coste Total				693	

U.O.2 Modelado y simulación del motor					
Código	U.M.	Descripción	Rdto.	Precio	Importe (€)
M.O.1	h	Ingeniero Industrial	400	20	8000
M.O.2	h	Tutor para consulta y seguimiento	15	30	450
M.1	Ud.	Licencia de ANSYS 16.0	1	26400	26400
M.2	mes	Licencia de Autodesk Inventor Professional 2018	4	320,65	1285,6
%	-----	Costes Directos Complementarios	0,02	-----	722,71
%	-----	Costes Indirectos	0,03	-----	1084,07
Coste Total				37942,38	

**Estudio de la combustión en un motor de carga homogénea con encendido por
compresión**

U.O.3 Realización de memoria y presupuestos					
Código	U.M.	Descripción	Rdto.	Precio	Importe (€)
M.O.1	h	Ingeniero Industrial	90	20	1800
M.O.2	h	Tutor para consulta y seguimiento	3	30	90
M.3	mes	Licencia de Microsoft Office	4	8,8	35,2
%	-----	Costes Directos Complementarios	0,02	-----	38,504
%	-----	Costes Indirectos	0,03	-----	57,756
Coste Total				2021,46	

U.O.4 Gastos complementarios					
Código	U.M.	Descripción	Rdto.	Precio	Importe (€)
M.4	mes	Amortización del ordenador utilizado	6	8,33	50
M.5	Ud.	Material de oficina y reprografía	1	50	50
%	-----	Costes Directos Complementarios	0,02	-----	2
%	-----	Costes Indirectos	0,03	-----	3
Coste Total				105	

- **Cuadro de precios unitarios:**

Código	Descripción	Coste (€)
U.O.1	Estudio de mercado y búsqueda de información	693
U.O.2	Modelado y simulación del motor	37942,38
U.O.3	Realización de memoria, presupuestos y planos	2021,46
U.O.4	Gastos complementarios	105

2.2. Presupuesto general del trabajo

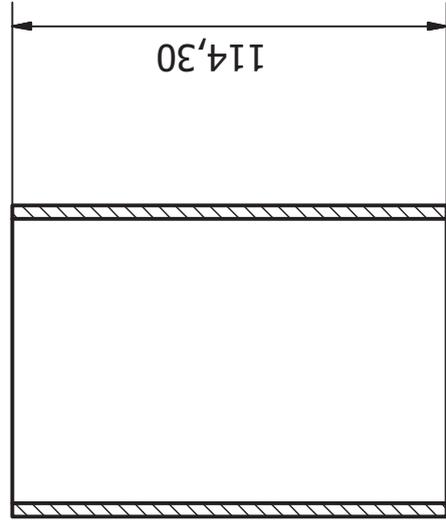
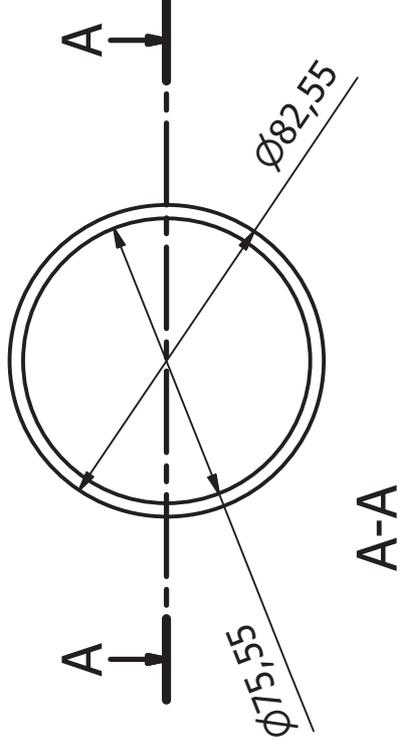
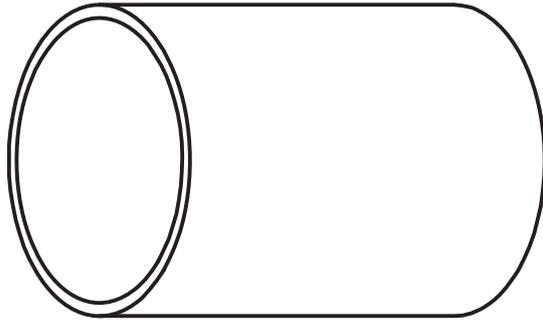
Código	Descripción	Cantidad	Precio	Importe (€)
U.O.1	Estudio de mercado y búsqueda de información	1	693	693
U.O.2	Modelado y simulación del motor	1	37942,38	37942,38
U.O.3	Realización de memoria, presupuestos y planos	1	2021,46	2021,46
U.O.4	Gastos complementarios	1	105	105
Presupuesto de ejecución material				40761,84
13 % de Gastos generales				5299,04
6 % de Beneficio Industrial				2445,71
Presupuesto de ejecución por contrata				48506,6
21 % de IVA				10186,4
Presupuesto Final				58692,97

Por tanto, el coste total de este trabajo de fin de grado asciende a la cantidad citada de:

CINCUENTA Y OCHO MIL SEISCIENTOS NOVENTA Y DOS CON NOVENTA Y SIETE EUROS

Documento II

Planos



TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA
EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



UNIVERSITAT
POLITECNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

Proyecto:

ESTUDIO DE LA COMBUSTIÓN EN UN MOTOR
DE CARGA HOMGÉNEA CON ENCENDIDO POR
COMPRESIÓN

Pieza: CILINDRO

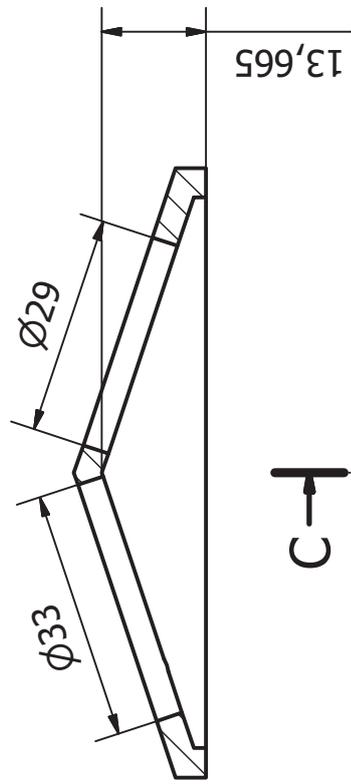
Fecha:
SEPTIEMBRE 2018

Escala:
1:2

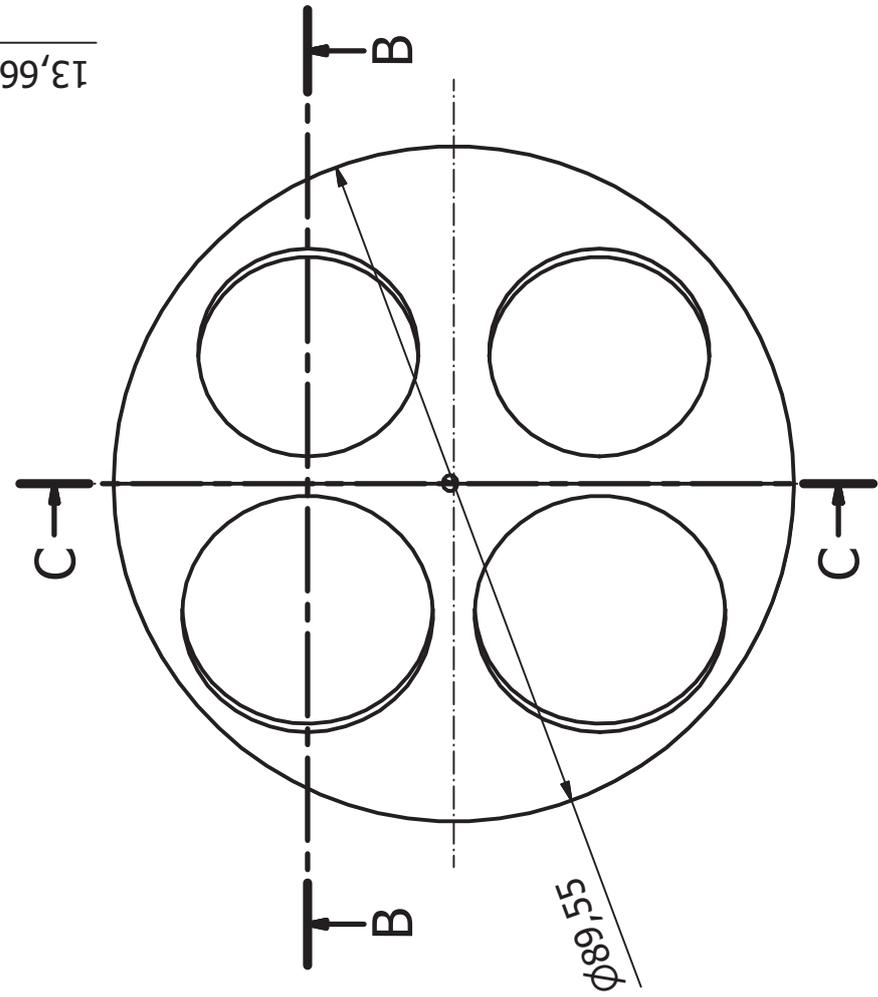
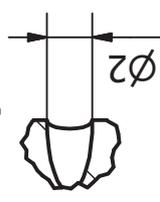
Nº de Plano:

1

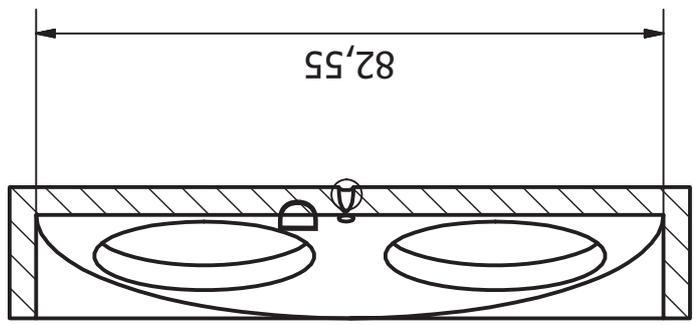
B-B



D (3:1)



C-C



TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIEROS INDUSTRIALES VALENCIA

Proyecto:

ESTUDIO DE LA COMBUSTIÓN EN UN MOTOR DE CARGA HOMGÉNEA CON ENCENDIDO POR COMPRESIÓN

Pieza: CÁMARA DE COMBUSTIÓN

Autor: SERGIO FRUTOS PINÉS

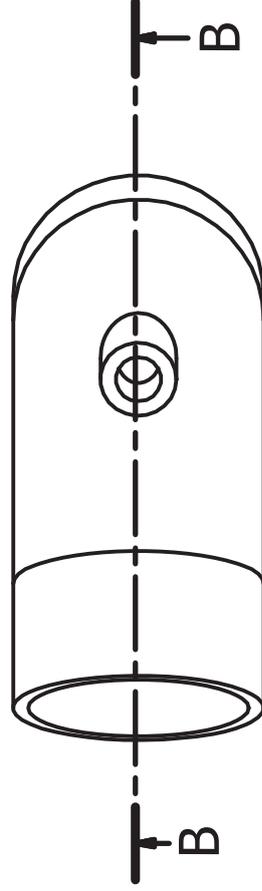
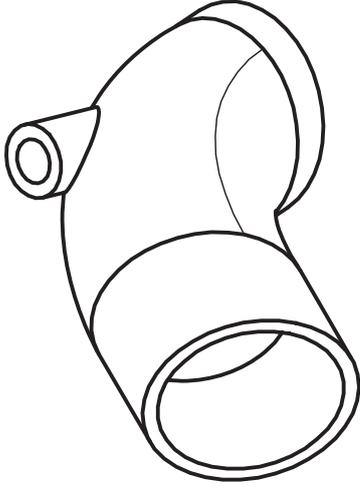
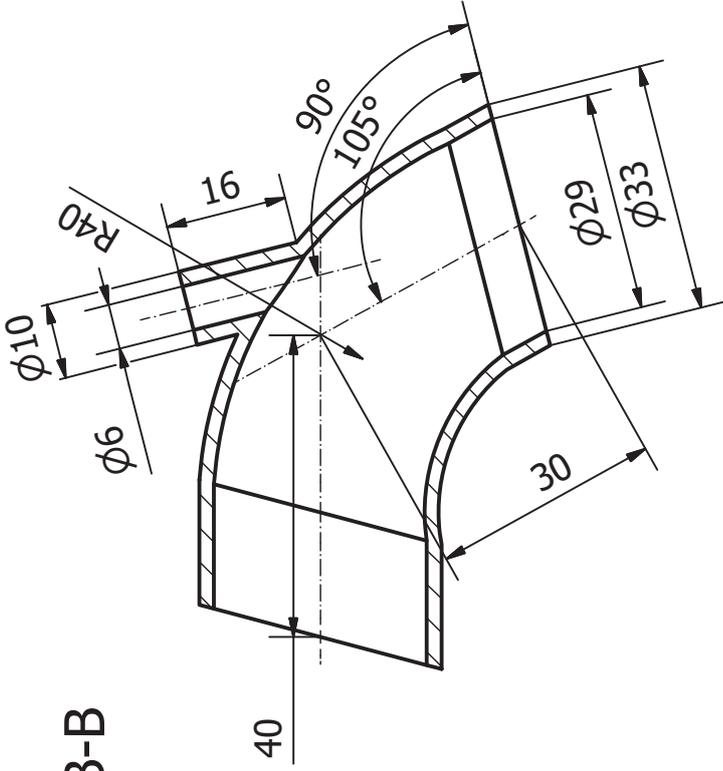
Fecha: SEPTIEMBRE 2018

Escala: 1:1

Nº de Plano:

2

B-B



TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA
EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



UNIVERSITAT
POLITECNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

Proyecto:

ESTUDIO DE LA COMBUSTIÓN EN UN MOTOR
DE CARGA HOMGÈNEA CON ENCENDIDO POR
COMPRESIÓN

Pieza: COLECTOR DE ADMISIÓN

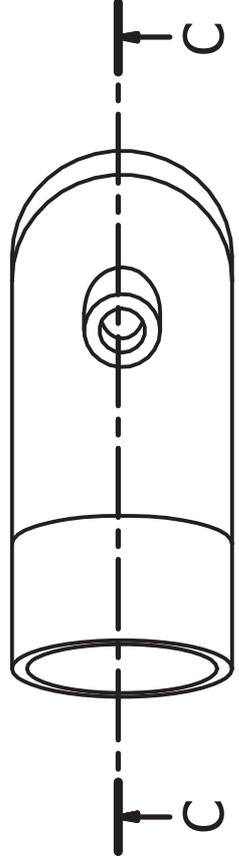
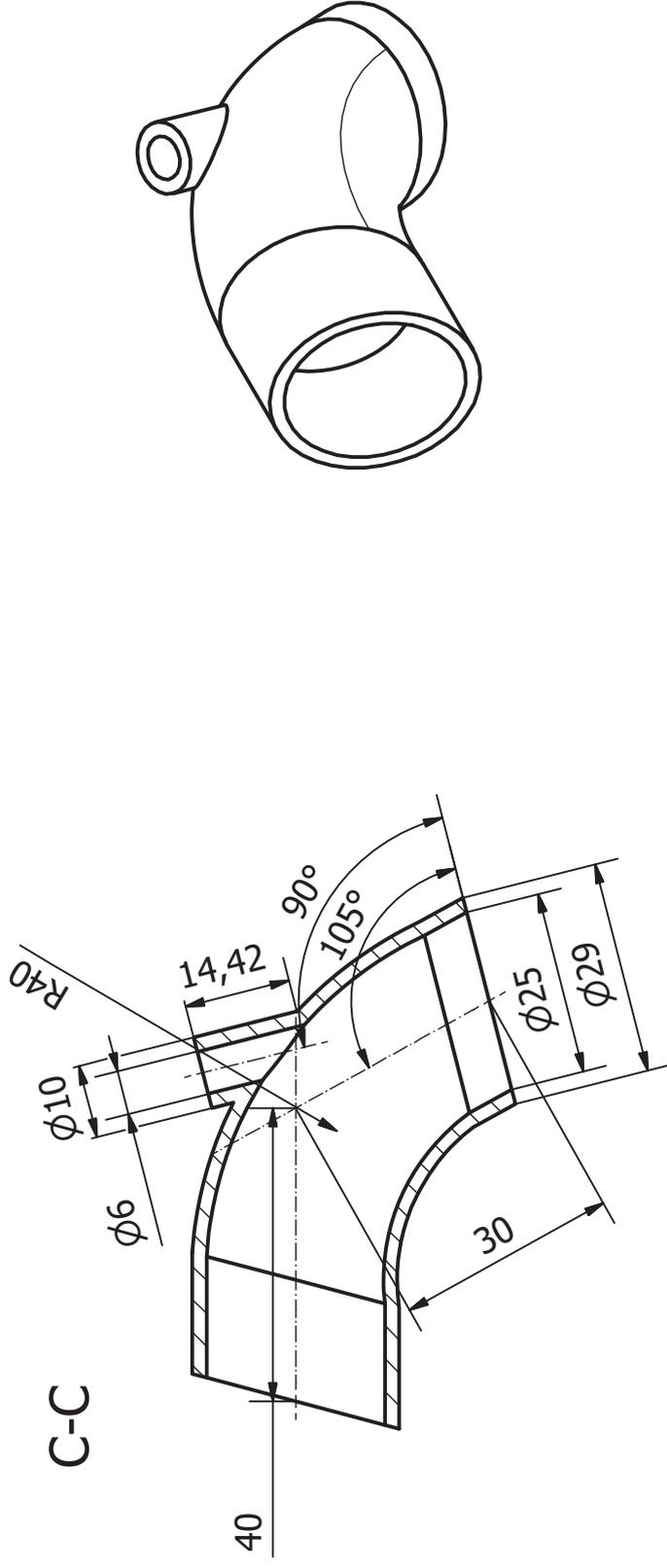
Fecha:
SEPTIEMBRE 2018

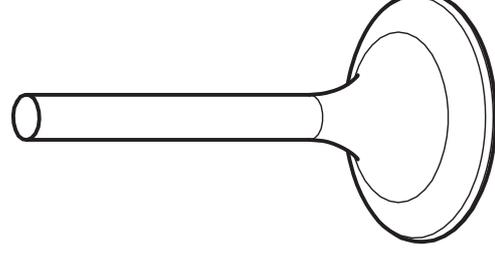
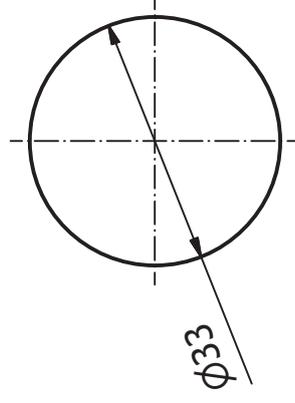
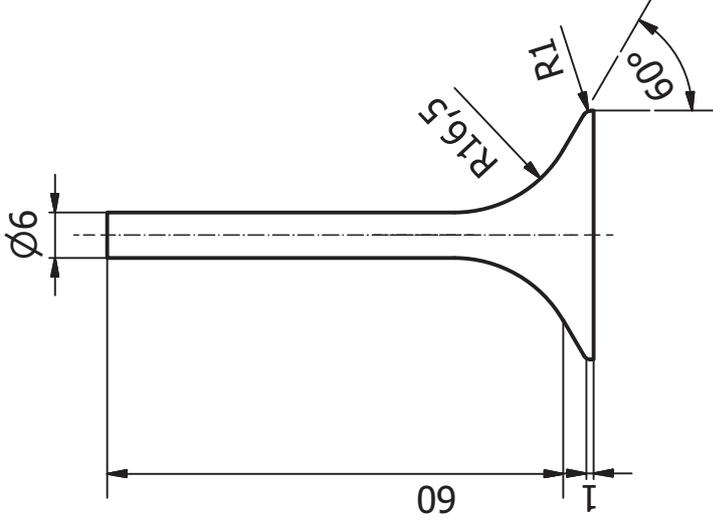
Autor: SERGIO FRUTOS PINÉS

Escala:
1:1

Nº de Plano:

3





TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA
EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



UNIVERSITAT
POLITECNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALÈNCIA

Proyecto:

ESTUDIO DE LA COMBUSTIÓN EN UN MOTOR
DE CARGA HOMGÉNEA CON ENCENDIDO POR
COMPRESIÓN

Pieza: VÁLVULA DE ADMISIÓN

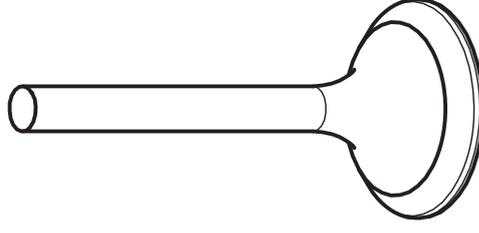
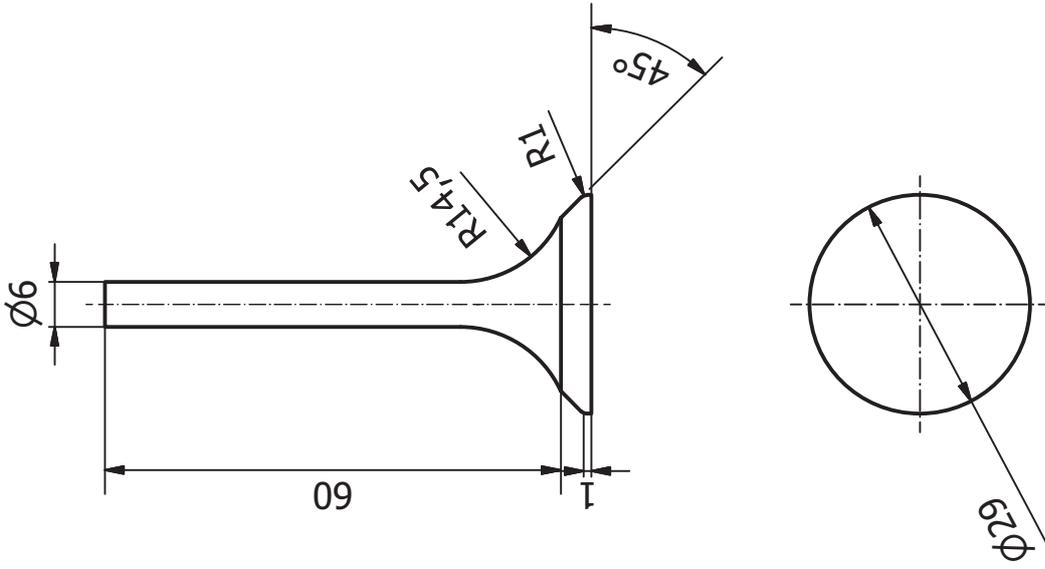
Autor: SERGIO FRUTOS PINÉS

Fecha:
SEPTIEMBRE 2018

Escala:
1:1

Nº de Plano:

5



TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA
EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

Proyecto:

ESTUDIO DE LA COMBUSTIÓN EN UN MOTOR
DE CARGA HOMGÉNEA CON ENCENDIDO POR
COMPRESIÓN

Pieza: VÁLVULA DE ESCAPE

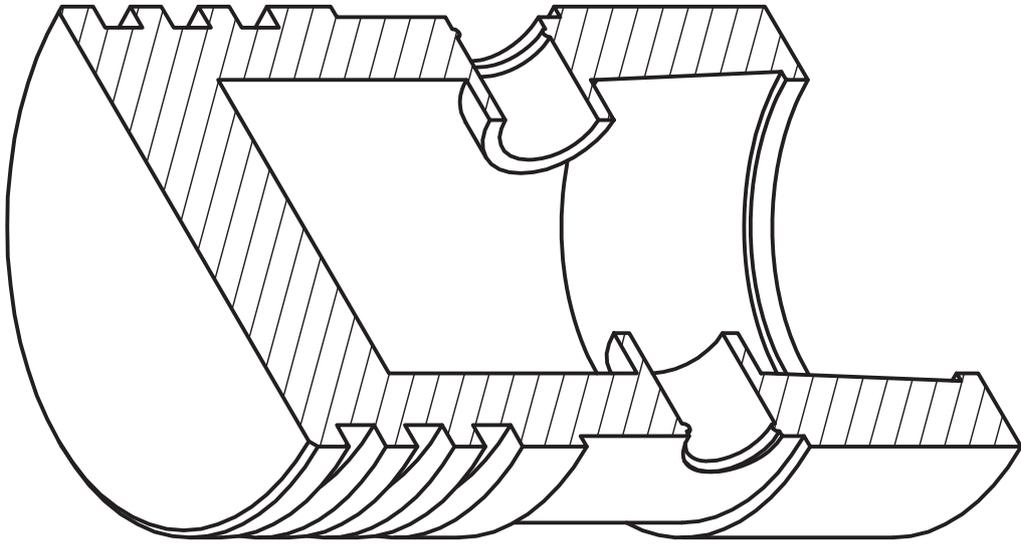
Autor: SERGIO FRUTOS PINÉS

Fecha:
SEPTIEMBRE 2018

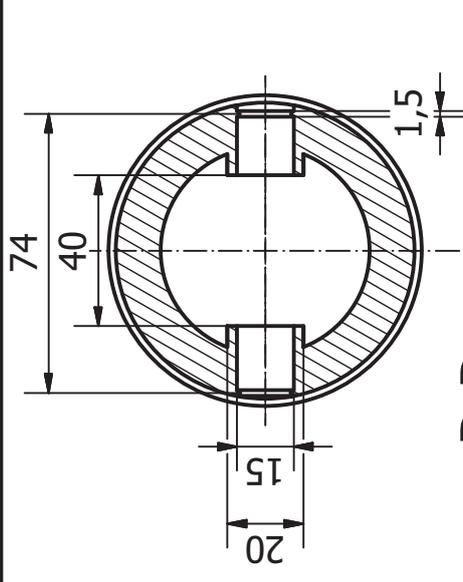
Escala:
1:1

Nº de Plano:

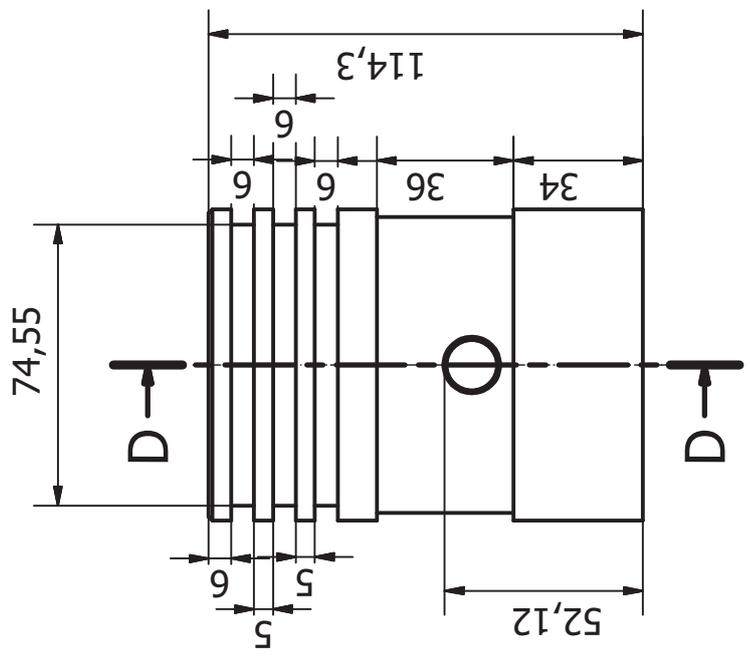
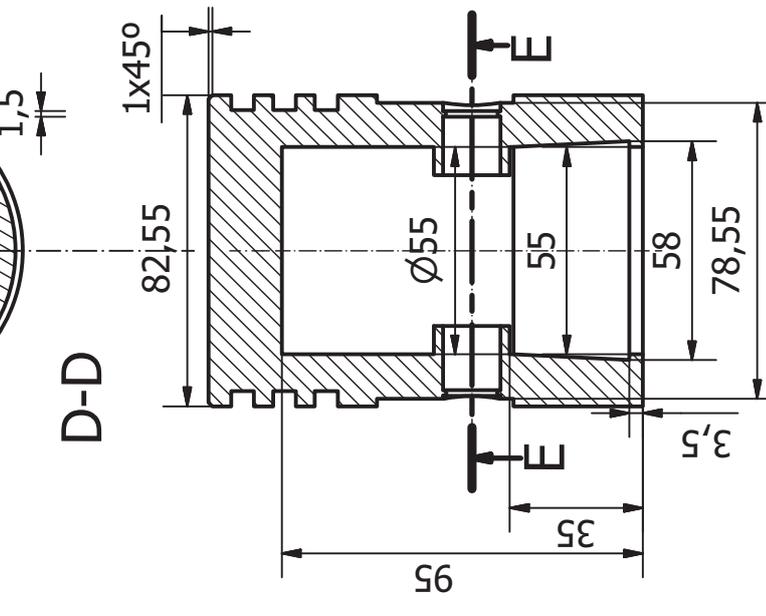
6



E-E



D-D



TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIEROS INDUSTRIALES VALENCIA

Proyecto:

ESTUDIO DE LA COMBUSTIÓN EN UN MOTOR DE CARGA HOMGÉNEA CON ENCENDIDO POR COMPRESIÓN

Pieza: PISTÓN

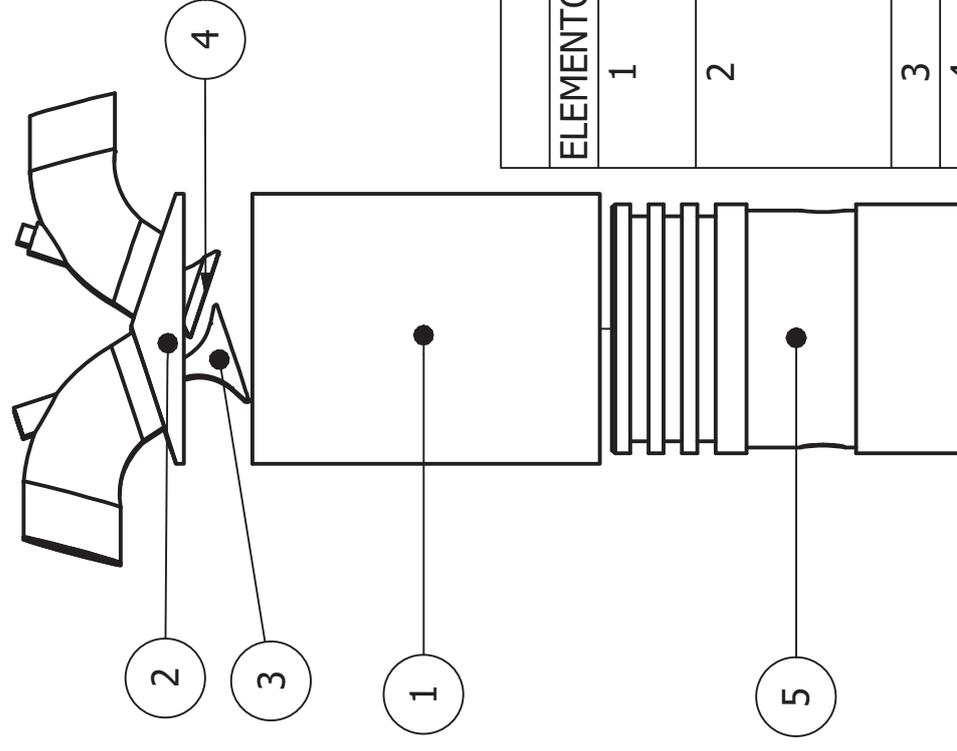
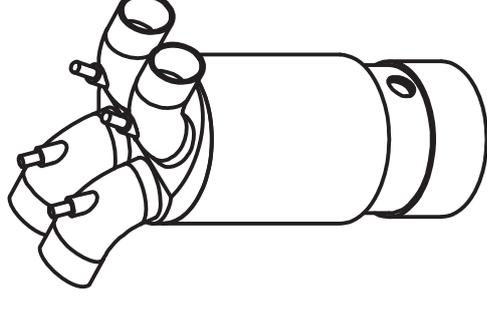
Autor: SERGIO FRUTOS PINÉS

Fecha: SEPTIEMBRE 2018

Escala: 1:2

Nº de Plano:

7



LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Cilindro	Zona estanca dentro de la que se desplaza el pistón.
2	1 y 2	Cámara de combustión y Colectores	En la cámara de combustión sucede la combustión de la mezcla y en los colectores fluyen el aire de admisión y los gases de escape.
3	2	Válvula de admisión	Controla la entrada del aire.
4	2	Válvula de escape	Controla la salida de los gases de escape
5	1	Pistón	Comprime la mezcla y absorbe la energía de la combustión.