



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

  
ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial  
y Diseño Industrial

Estudio numérico de las prestaciones y emisiones de un  
vehículo propulsado por hidrógeno

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

AUTOR/A: Sánchez Ruiz, Marta

Tutor/a: Gómez Soriano, Josep

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



# RESUMEN

Existe hoy en día una creciente preocupación por la contaminación y los efectos nocivos que tiene sobre el planeta y la salud de las personas. La contaminación atmosférica en concreto está fundamentalmente causada por las emisiones de gases de efecto invernadero. En el proceso de combustión llevado a cabo por los motores de combustión interna alternativos utilizados en automoción se generan  $\text{CO}_2$  y  $\text{NO}_x$ , dos de los principales gases de efecto invernadero. Por este motivo se está desarrollando en todo el mundo una tendencia hacia la movilidad sostenible.

Este trabajo está motivado por esa tendencia hacia el transporte verde, siguiendo así el camino hacia los vehículos de 0 emisiones. Para ello, se propone un estudio numérico de las prestaciones proporcionadas por un motor de encendido provocado adaptado a uso de hidrógeno como combustible. El modelo adaptado tiene como objetivo eliminar por completo las emisiones de  $\text{CO}_2$  y reducir al máximo las de  $\text{NO}_x$  sin perjudicar demasiado al consumo específico y el alcance del vehículo.

El estudio realizado trata de conseguir la optimización de las prestaciones del motor y evaluar cómo afecta la integración del modelo a nivel vehículo. La evaluación se lleva a cabo mediante la obtención de datos de consumo específico de combustible y emisiones de  $\text{NO}_x$ . Estos resultados, evaluados para distintos ciclos de conducción, permiten obtener una estimación del alcance que tendrá el vehículo y su eficiencia y por consiguiente se podrá valorar lo factible que resulta esta adaptación.

# ABSTRACT

There is a growing concern today about pollution and its harmful effects on the planet and human health. Atmospheric pollution specifically is fundamentally caused by greenhouse gas emissions. During the combustion process carried out by internal combustion engines used in automotive applications, CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> are generated, two of the main greenhouse gases. For this reason, there is a worldwide trend towards sustainable mobility.

This paper is motivated by this trend towards green transportation, thus following the path towards zero-emission vehicles. To this end, a numerical study of the performance provided by a spark-ignition engine adapted to use hydrogen as fuel is proposed. The adapted model aims to eliminate CO<sub>2</sub> emissions and minimize NO<sub>x</sub> emissions without significantly affecting the specific consumption and range of the vehicle.

The study aims to optimize the engine's performance and evaluate how the integration of the model affects the vehicle level. The evaluation is carried out by obtaining data on specific fuel consumption and NO<sub>x</sub> emissions. These results, evaluated for different driving cycles, allow for an estimation of the vehicle's range and efficiency and, consequently, an assessment of the feasibility of this adaptation.

# RESUM

Existix hui dia una creixent preocupació per la contaminació i els efectes nocius que té sobre el planeta i la salut de les persones. La contaminació atmosfèrica en concret és fonamentalment causada per les emissions de gasos d'efecte d'hivernacle. En el procés de combustió dut a terme pels motors de combustió interna alternatius utilitzats en automoció es generen  $\text{CO}_2$  i  $\text{NO}_x$ , dos dels principals gasos d'efecte d'hivernacle. Per este motiu s'està desenvolupant a tot el món una tendència cap a la mobilitat sostenible.

Este treball està motivat per eixa tendència cap al transport verd, seguint així el camí cap als vehicles de 0 emissions. Per a això, es proposa un estudi numèric de les prestacions proporcionades per un motor d'encesa provocada adaptada a ús d'hidrogen com a combustible. El model adaptat té com a objectiu eliminar per complet les emissions de  $\text{CO}_2$  i reduir al màxim les de  $\text{NO}_x$  sense perjudicar massa el consum específic i l'abast del vehicle.

L'estudi realitzat tracta d'aconseguir l'optimització de les prestacions del motor i avaluar com afecta la integració del model a nivell vehicle. L'avaluació es duu a terme mitjançant l'obtenció de dades de consum específic de combustible i emissions de  $\text{NO}_x$ . Estos resultats, avaluats per a diferents cicles de conducció, permeten obtindre una estimació de l'abast que tindrà el vehicle i la seua eficiència i per consegüent es podrà valorar el factible que resulta esta adaptació.



## DOCUMENTO I

MEMORIA

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>11</b>
1.1. PROBLEMÁTICA DE EMISIONES CONTAMINANTES Y NORMATIVA EUROPEA .....	11
1.2. COMBUSTIÓN EN MCIA .....	13
1.3. PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE .....	14
1.4. MOTORES DE ENCENDIDO PROVOCADO .....	15
<b>2. OBJETIVO</b> .....	<b>17</b>
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>19</b>
3.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DEL MOTOR .....	19
3.2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DEL VEHÍCULO .....	23
3.3. HERRAMIENTAS DE PROCESADO .....	24
<b>4. METODOLOGÍA</b> .....	<b>28</b>
4.1. OPTIMIZACIÓN EN CONDICIONES DE MOTOR DE LA RELACIÓN AIRE-COMBUSTIBLE PARA DIFERENTES REGÍMENES DE GIRO Y PAR .....	28
4.2. DISEÑO DE RUTAS Y SIMULACIÓN DE CICLOS DE CONDUCCIÓN .....	30
<b>5. RESULTADOS</b> .....	<b>34</b>
5.1. RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN EN CONDICIONES DE MOTOR .....	34
5.2. ANÁLISIS DE CONDICIONES DE VEHÍCULO .....	40
a. <i>Ciclo de conducción estándar (WLTC 3)</i> .....	40
b. <i>Ciclo de conducción real</i> .....	41
c. <i>Comparativa de los anteriores</i> .....	42
d. <i>Aplicación en la realidad</i> .....	42
<b>6. CONCLUSIONES</b> .....	<b>44</b>
<b>ANEXO I. RESULTADOS OPTIMIZACIÓN CA50</b> .....	<b>45</b>
<b>ANEXO II. CÁLCULO DEL VOLUMEN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE LA MASA CONSUMIDA</b> .....	<b>47</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>49</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: PROMEDIOS ANUALES DEL AUMENTO ESTIMADO DE LA TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE GLOBAL POR ENCIMA DE LOS NIVELES DE REFERENCIA DE 1991-2020 (EJE DE LA IZQUIERDA) Y 1850-1900 (EJE DE LA DERECHA). 2022 SE BASA ÚNICAMENTE EN ERA5, TODOS LOS DEMÁS AÑOS SEGÚN SEIS CONJUNTOS DE DATOS DIFERENTES. FUENTES DE DATOS: ERA5 (C3S/ECMWF), JRA-55 (JMA), GISTEMPv4 (NASA), HADCRUT5 (MET OFFICE HADLEY CENTRE), NOAA GLOBALTEMPV5 (NOAA) Y BERKELEY EARTH. CRÉDITO: SERVICIO DE CAMBIO CLIMÁTICO COPERNICUS/ECMWF. ....	11
FIGURA 2: EVOLUCIÓN DE EMISIONES DE CO <sub>2</sub> EN LA UE POR SECTORES ENTRE 1990 Y 2019. ....	12
FIGURA 3: EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN EL TRANSPORTE. ....	12
FIGURA 4: FASES DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN EN MCIA. [10].....	13
FIGURA 5: ESQUEMA DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL DEL MODELO.....	20
FIGURA 6: CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN CASO A (SIN EGR) Y CASO B (CON EGR) PARA EL SISTEMA DE PROPULSIÓN CONVENCIONAL EN CADA FASE DEL CICLO DE CONDUCCIÓN.....	21
FIGURA 7: LÍNEAS DE MÁXIMA POTENCIA FRENTE AL PAR PARA DISTINTOS $\lambda$ .....	21
FIGURA 8: ESQUEMA DEL MODELO DE VEHÍCULO CONVENCIONAL UTILIZADO. ....	23
FIGURA 9: PERFIL DE VELOCIDAD CICLO DE CONDUCCIÓN WLTC 3.....	30
FIGURA 10: INTRODUCCIÓN DE DATOS PARA SIMULACIÓN DE CICLOS EN GT-SUITE.....	31
FIGURA 11: PERFIL DE VELOCIDAD DEL CICLO DE CONDUCCIÓN AEROPUERTO VLC-UPV. ....	32
FIGURA 12: PERFIL DE VELOCIDAD DEL CICLO DE CONDUCCIÓN AEROPUERTO VLC-UM. ....	32
FIGURA 13: RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES A 1250 RPM.....	34
FIGURA 14: RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES A 1500 RPM.....	34
FIGURA 15: RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES A 1500 RPM.....	35
FIGURA 16: RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES A 2000 RPM.....	35
FIGURA 17: RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES A 2000 RPM.....	36
FIGURA 18: RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES A 2000 Y 2500 RPM.....	36
FIGURA 19: RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES A 2500 RPM.....	37
FIGURA 20: RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES A 3000 RPM.....	37
FIGURA 21: MAPAS DE FUNCIONAMIENTO EN LOS DISTINTOS ESCENARIOS. ....	39
FIGURA 22: MAPAS DE DIFERENCIA DE FUNCIONAMIENTO ENTRE ESTRATEGIAS. ....	39
FIGURA 23: FACTOR DE COMPRESIBILIDAD DEL H <sub>2</sub> .....	47
FIGURA 24: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL FACTOR DE COMPRESIBILIDAD DEL H <sub>2</sub> .....	47
FIGURA 25: CÁLCULO DE LA CONVERSIÓN DE MASA A VOLUMEN DE H <sub>2</sub> .....	48

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DEL HIDRÓGENO FRENTE A LAS DE LA GASOLINA. [8] .....	15
TABLA 2: CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR MODELADO PARA ESTUDIO. ....	19
TABLA 3: ESPECIFICACIONES DEL SUV SELECCIONADO. ....	24
TABLA 4: MODELO DE FUNCIONAMIENTO DE MOTOR PARA SIMULACIÓN EN GT-SUITE. ....	28
TABLA 5: PUNTOS DE FUNCIONAMIENTO ESCOGIDOS PARA OPTIMIZACIÓN DE PRESTACIONES DEL MODELO DE MOTOR. .....	29
TABLA 6: PUNTOS DE FUNCIONAMIENTO A ÓPTIMO BSFC PARA EL MODELO DE MOTOR. ....	38
TABLA 7: PUNTOS DE FUNCIONAMIENTO A ÓPTIMOS NOX PARA EL MODELO DE MOTOR. ....	38
TABLA 8: RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE CICLO DE CONDUCCIÓN ESTÁNDAR WLTC 3. ....	40
TABLA 9: RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE CICLO DE CONDUCCIÓN REAL INTERURBANO. ....	41
TABLA 10: RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE CICLO DE CONDUCCIÓN REAL POR CARRETERA. ....	41
TABLA 11: CA50 ÓPTIMOS PARA 1250x42 .....	45
TABLA 12: CA50 ÓPTIMOS PARA 1250x120 .....	45
TABLA 13: CA50 ÓPTIMOS PARA 1500x22 .....	45
TABLA 14: CA50 ÓPTIMOS PARA 1500x62 .....	45
TABLA 15: CA50 ÓPTIMOS PARA 1500x124 .....	45
TABLA 16: CA50 ÓPTIMOS PARA 1500x220 .....	45
TABLA 17: CA50 ÓPTIMOS PARA 2000x22 .....	45
TABLA 18: CA50 ÓPTIMOS PARA 2000x62 .....	45
TABLA 19: CA50 ÓPTIMOS PARA 2000x157 .....	46
TABLA 20: CA50 ÓPTIMOS PARA 2000x103 .....	46
TABLA 21: CA50 ÓPTIMOS PARA 2000x254 .....	46
TABLA 22: CA50 ÓPTIMOS PARA 2500x31 .....	46
TABLA 23: CA50 ÓPTIMOS PARA 2500x62 .....	46
TABLA 24: CA50 ÓPTIMOS PARA 2500x145 .....	46
TABLA 25: CA50 ÓPTIMOS PARA 3000x124 .....	46
TABLA 26: CA50 ÓPTIMOS PARA 3000x223 .....	46

## APARTADO 1

### INTRODUCCIÓN

- 1.1. Problemática de emisiones contaminantes y normativa europea.
- 1.2. Combustión en MCI
- 1.3. Propiedades del hidrógeno como combustible.
- 1.4. Motores de encendido provocado.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Problemática de emisiones contaminantes y normativa europea

En los últimos años, se ha ido tomando conciencia acerca de las emisiones contaminantes producidas por el ser humano y su gran repercusión en el medioambiente y la salud.

Nuestra atmósfera está compuesta casi en su totalidad de: Nitrógeno (78,1%) y Oxígeno (20,9%), además de una serie de gases como el Argón, el Helio y los gases de efecto invernadero como el Dióxido de Carbono y el Ozono. La atmósfera también contiene vapor de agua en cantidades variables. Los gases de efecto invernadero son los encargados de absorber la radiación infrarroja (el calor) emitida desde la superficie de la Tierra y volver a irradiarlo sobre ella. Esto está provocando el famoso “Cambio Climático”, que no es más que un aumento de concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera que está llevando al aumento de temperaturas en la Tierra. En 2022, las temperaturas se elevaron más de 1º por encima del promedio del nivel preindustrial. Estos datos se muestran representados en la *Figura 1*.

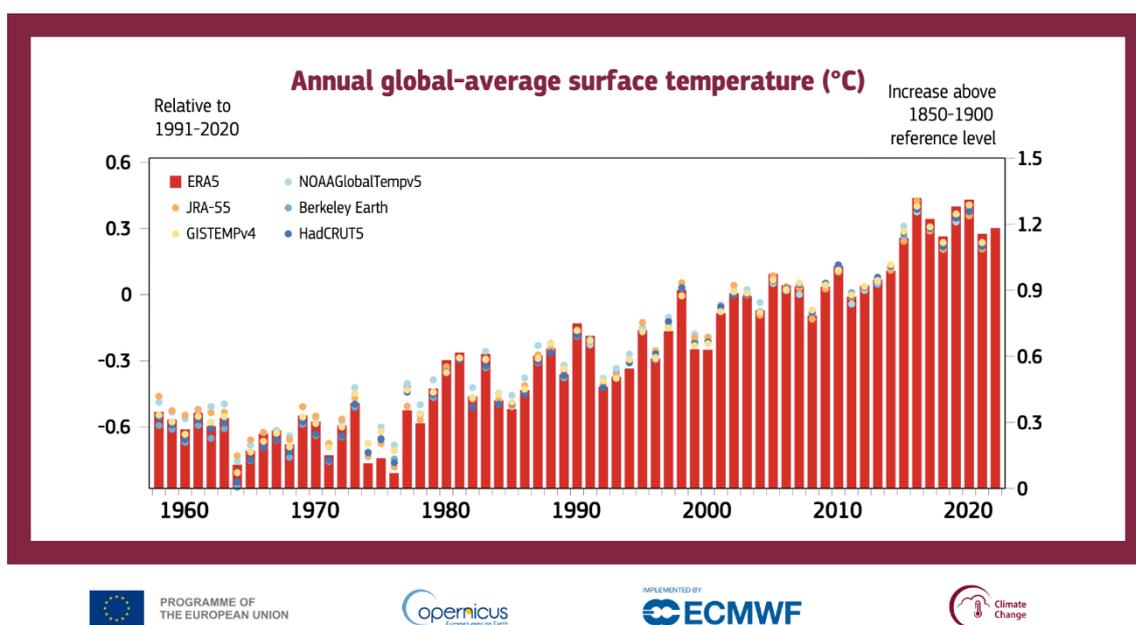


Figura 1: Promedios anuales del aumento estimado de la temperatura de la superficie global por encima de los niveles de referencia de 1991-2020 (eje de la izquierda) y 1850-1900 (eje de la derecha). 2022 se basa únicamente en ERA5, todos los demás años según seis conjuntos de datos diferentes. Fuentes de datos: ERA5 (C3S/ECMWF), JRA-55 (JMA), GISTEMPv4 (NASA), HadCRUT5 (Met Office Hadley Centre), NOAA GlobalTempv5 (NOAA) y Berkeley Earth. Crédito: Servicio de Cambio Climático Copernicus/ECMWF.

Según los datos proporcionados por el Parlamento Europeo recogidos en un informe de la Agencia Europea del Medio Ambiente y mostrados en la *Figura 2*, el transporte era responsable de cerca de una cuarta parte de CO<sub>2</sub> en la Unión Europea (UE) en 2019, de las cuales el 71,7% provenía del transporte por carretera.

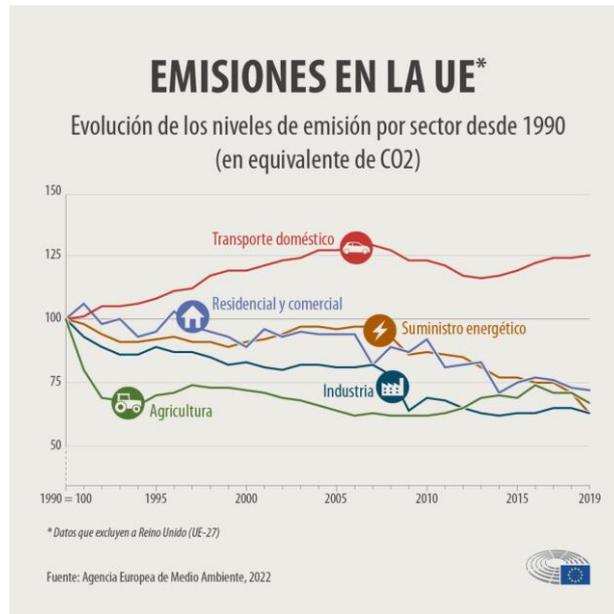


Figura 2: Evolución de emisiones de CO<sub>2</sub> en la UE por sectores entre 1990 y 2019.

Los estudios realizados por la UE concluyen que, para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y alcanzar la neutralidad climática del Pacto Verde Europeo, habría que disminuir en un 90% las emisiones de gases de efecto invernadero del transporte para 2050, un propósito para nada asequible en la actualidad ya que las proyecciones sitúan esta disminución en solo un 22%, un valor muy por debajo del objetivo.

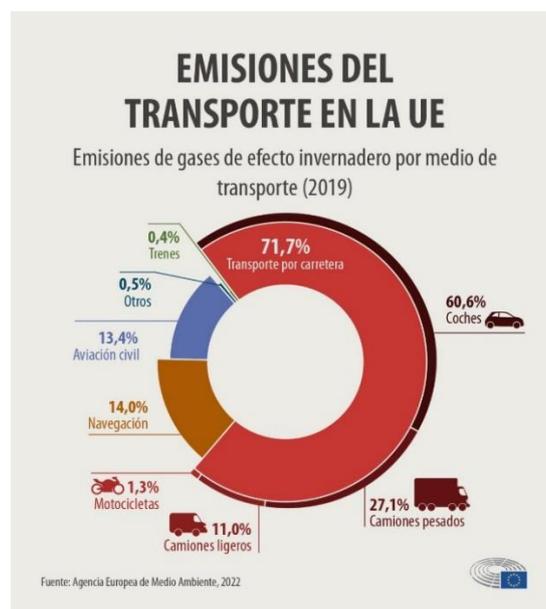


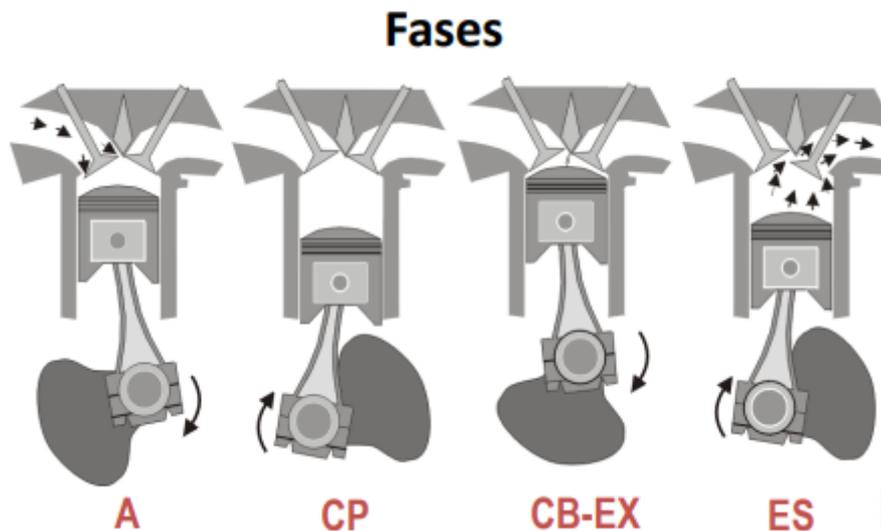
Figura 3: Emisiones de gases de efecto invernadero en el transporte.

Como se aprecia en la *Figura 3*, el transporte por carretera representa aproximadamente una quinta parte de las emisiones contaminantes en la UE. Es por este motivo que se están aplicando fuertes limitaciones en el uso de combustibles fósiles en transporte por carretera y en los niveles de emisiones permitidos en este ámbito.

## 1.2. Combustión en MCIA

El proceso de combustión en Motores de Combustión Interna Alternativos (MCIA) consiste en la quema de una mezcla aire-combustible encerrada en cilindros y previamente presurizada con la ayuda de pistones. Al quemar la mezcla, se obtienen gases calientes que se expanden y empujan al pistón que está a su vez conectado al cigüeñal por medio de bielas. Al activar el movimiento del cigüeñal se convierte la energía química liberada por los gases, en energía mecánica.

El proceso llevado a cabo por los MCIA se divide en cuatro fases bien diferenciadas en la *Figura 4*.



*Figura 4: Fases del proceso de combustión en MCIA. [10]*

Siendo,

**A:** Admisión. En esta fase se abre la válvula que deja entrar aire limpio para la formación de la mezcla adecuada para la combustión, el pistón baja desde el punto muerto superior (PMS) al punto muerto inferior (PMI).

**CP:** Compresión. Durante la compresión el pistón sube del PMI al PMS. Se inyecta el combustible ayudando a que al llegar el pistón al PMS la mezcla esté totalmente homogénea y lista para la combustión a la presión necesaria.

**CB-EX:** Combustión-Expansión. Cuando el pistón se encuentra justo en el PMS tras la compresión se produce el encendido de la mezcla, bien mediante una bujía (encendido provocado) o por haber alcanzado la presión y temperatura de autoignición (encendido por compresión). Inmediatamente el pistón vuelve al PMI dando lugar a la expansión, provocada por la energía liberada en la combustión y dando lugar así a la energía mecánica buscada.

ES: Escape. Mientras el pistón vuelve a su posición inicial en el PMI, se abre la válvula de escape dejando salir los gases de escape producto de la combustión para limpiar los cilindros y dejar entrar de nuevo aire limpio para la formación de la nueva mezcla.

Parte de la quema de la mezcla deriva en la producción de emisiones contaminantes, los anteriormente llamados gases de escape. Las principales emisiones generadas reguladas por normativa son: Monóxido de carbono (CO), hidrocarburos sin quemar (HC), óxidos de nitrógeno (NOx) y partículas líquidas y sólidas.

Este trabajo se ha centrado en intentar reducir principalmente las emisiones de gases de efecto invernadero. Con este modelo se eliminarían por completo los HC y el CO, y se reducirían notablemente las emisiones de NOx.

### 1.3. Propiedades del hidrógeno como combustible

El hidrógeno como combustible presenta varias ventajas significativas frente a los combustibles fósiles utilizados actualmente en vehículos de automoción, haciendo de él una opción atractiva para el futuro de la movilidad y la energía sostenible. A continuación, se destacan algunos de los beneficios más relevantes:

- Cero emisiones de carbono en su uso: A diferencia de la gasolina, cuya combustión ya se ha mencionado anteriormente que produce dióxido de carbono y otros contaminantes, el hidrógeno solo genera vapor de agua como subproducto.
- Abundancia y sostenibilidad: El hidrógeno es el elemento más abundante en el universo y puede obtenerse a partir de diversas fuentes, incluyendo el agua por electrólisis y el gas natural por medio de procesos de reformado. Utilizando energías renovables para la realización de estos procesos, se puede garantizar un suministro sostenible y limpio.
- Reducción de contaminantes: Además de no producir CO<sub>2</sub>, hidrocarburos no quemados y partículas (hollín), el hidrógeno emite mucha menos cantidad de otros contaminantes nocivos como los ya aludidos NOx, todos estos son muy comunes en la combustión de combustibles fósiles y responsables de la contaminación del aire y problemas de salud respiratoria.
- Potencial económico: La transición hacia un hidrógeno verde puede crear nuevas oportunidades económicas y empleos en sectores como la producción de energía renovable, la manufactura de equipos y la infraestructura de distribución de hidrógeno. Este cambio puede también reducir la dependencia de los combustibles fósiles importados, mejorando la seguridad energética.
- Mayor eficiencia energética: como se verá numéricamente a continuación, los motores y celdas de combustible de hidrógeno pueden ser más eficientes que los MCIAs convencionales que utilizan combustibles fósiles, dado el gran poder calorífico de este.

En la *Tabla 1* se recogen las propiedades más relevantes del hidrógeno a tener en cuenta para su utilización como combustible en MCIAs, comparadas con las de la gasolina.

Propiedad	Hidrógeno	Gasolina
<b>Fórmula química</b>	H <sub>2</sub>	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>
<b>Temperatura de autoignición</b>	571	280
<b>Temperatura adiabática de llama</b>	2254	2138
<b>Poder calorífico inferior (MJ/kg)</b>	120	45
<b>Densidad gaseosa</b>	0.08	-
<b>Densidad líquida</b>	71	730

*Tabla 1: Propiedades fisicoquímicas del hidrógeno frente a las de la gasolina. [8]*

Cabe destacar de esta tabla el alto poder calorífico que posee el hidrógeno, siendo este casi tres veces el de la gasolina, así como de la alta temperatura de autoignición del hidrógeno, lo que reduce las opciones de adaptación entre los MCIAs.

En conclusión, el hidrógeno ofrece unos beneficios en cuanto a prestaciones energéticas, sostenibilidad y economía que lo sitúan como el camino más prometedor al transporte limpio y sostenible.

## 1.4. Motores de encendido provocado

En el anterior apartado se ha resaltado que la temperatura de autoignición del hidrógeno es extremadamente alta. En consecuencia, es muy improbable que este pueda inflamarse solo con las temperaturas alcanzadas durante la fase de compresión. Por esta razón la adaptación de MCIAs para combustión de hidrógeno parece tender hacia los Motores de Encendido Provocado (MEP).

Además, la adaptación de estos motores es mucho más sencilla ya que únicamente habría que modificar el sistema de aspiración o turbogrupo para lograr buenas prestaciones. En trabajos anteriores se ha comprobado que, reduciendo el tamaño de la voluta, la lengua del compresor y de la turbina en un 20% sobre el tamaño original en motor gasolina, se consigue aumentar la carga (evitando la entrada en bombeo) y tener una relación de expansión mayor, lo que lleva a una mejora en el rendimiento de ambos.

Otro cambio que permitirá la adaptación del motor a combustible de hidrógeno será eliminar el sistema de postratamiento GPF (filtro de partículas). Este dejará de ser necesario ya que el único producto de la combustión será vapor de agua, lo que llevará a una notable disminución de la pérdida de carga (hasta un 80%).

Estas ventajas en cuanto a la adaptación son las que llevan a elegir los Motores de Encendido Provocado para este estudio.

## APARTADO 2

### OBJETIVOS

- 2.1. Análisis del impacto del uso de hidrógeno en motores gasolina de automoción.

## 2. OBJETIVO

Actualmente, no existe una estrategia extendida a la hora de optimizar las prestaciones y las emisiones contaminantes en motores MEP operados con H<sub>2</sub>. **El objetivo principal de este trabajo se centra en evaluar el potencial de la dilución con aire para maximizar el rendimiento y minimizar las emisiones contaminantes en motores de combustión interna alternativos propulsados con hidrogeno.** Existen otros objetivos parciales que deberán cumplirse para garantizar la consecución del objetivo principal:

- Proponer una metodología numérica que proporcione información precisa de las prestaciones y niveles de emisiones contaminantes en vehículos propulsados por motores de combustión interna alternativos usando hidrogeno como combustible.
- Diseñar un ciclo de conducción en condiciones realistas que permita evaluar el consumo y emisiones contaminantes en condiciones cercanas a la realidad.

## APARTADO 3

### MATERIALES Y MÉTODOS

- 3.1. Descripción del modelo del motor.
- 3.2. Descripción del modelo del vehículo.
- 3.3. Herramientas de procesado.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

Este proyecto parte de una serie de instalaciones experimentales y modelos numéricos que han sido ya validados en anteriores trabajos. Además, se han utilizado distintos programas informáticos para la obtención y postratamiento de datos. A continuación, se describen dichas herramientas empleadas para realizar la investigación.

#### 3.1. Descripción del modelo del motor

El modelo se basa en un motor gasolina turboalimentado de inyección directa de 1.3 litros cuyas características principales se recogen en la *Tabla 2*.

Características	Descripción
Tecnología	EURO 6 GTDI
Cilindrada	1300 cc
Relación de compresión	10:1
Número de cilindros	4
Sistema de distribución	VVT
N.º total de válvulas (admisión/escape)	8/8
Turbocompresor	Turbina de geometría variable
Sistema de postratamiento	Catalizador de tres vías y filtro de partículas

*Tabla 2: Características del motor modelado para estudio.*

El motor también está equipado con las siguientes tecnologías: un catalizador de tres vías, un filtro de partículas, un sistema de distribución variable (VVT) que permite ajustar el momento de apertura de las válvulas de admisión y escape (manteniendo constante la altura y la duración de la apertura de las válvulas) y una turbina de geometría variable (VGT).

Se utiliza un modelo 1D de un motor gasolina desarrollado mediante el software GT-Power, incorporando las tecnologías EGR, VVT y VGT. Dicho modelo ha sido anteriormente calibrado en distintos estudios previos como se explicará a continuación.

El procedimiento de calibración consta de tres etapas: optimización de parámetros de ajuste, validación del modelo y obtención de correlaciones empíricas. Estas correlaciones se implementan en el modelo para ajustar los fenómenos de transferencia de calor y caída de presión en las líneas y volúmenes del motor. Para este procedimiento se utiliza tanto una instalación experimental como el modelo numérico desarrollado operando con gasolina convencional.

En la primera etapa, se reproducen los ensayos del motor con el modelo 1D para ajustar los parámetros del modelo, como los multiplicadores de transferencia de calor, los multiplicadores de fricción y los coeficientes de descarga. Para ello, el modelo se configura de la siguiente manera: en primer lugar, se desacopla el turbocompresor desvinculando las potencias del compresor y la turbina para regular las presiones en los colectores de admisión y escape al mismo tiempo; y a continuación, se configura una serie de controladores PI para modificar los parámetros de ajuste.

Una vez se replican los ensayos del motor utilizando el modelo 1D, se lleva a cabo un proceso de validación. Los valores modelados del flujo másico de aire (AMF) y la presión efectiva media indicada (IMEP) se comparan con sus valores experimentales correspondientes. Además, se verifican las trazas de presión instantánea en los colectores y cilindros.

Para obtener correlaciones empíricas fiables que garanticen una calibración de alta calidad del modelo, se estableció un umbral de error del 5% para las variables AMF e IMEP. En otros términos, los parámetros de ajuste de cada simulación solo se emplearon como entradas para las correlaciones si los errores relativos de AMF e IMEP eran inferiores al 5%.

Para finalizar, se establecieron algunas correlaciones empíricas sobre la base de los parámetros de ajuste ya validados. El modelo 1D incorpora también mapas de turbocargadores expuestos en caliente que han sido anteriormente extrapolados considerando nula la transmisión de calor.

En la *Figura 5* se muestra un esquema de la instalación experimental en la que se basa el modelo. Se puede distinguir en este la ubicación de los sensores de presión (transmisores de tipo piezorresistivo 4260A) y temperatura (termopares de tipo K) en el modelo. Asimismo, se observa que aguas arriba del Four-Way Catalys (FWC) o catalizador de cuatro vías se conecta un analizador de gases HORIBA MEXA-ONE para medir las emisiones brutas de NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> y HC.

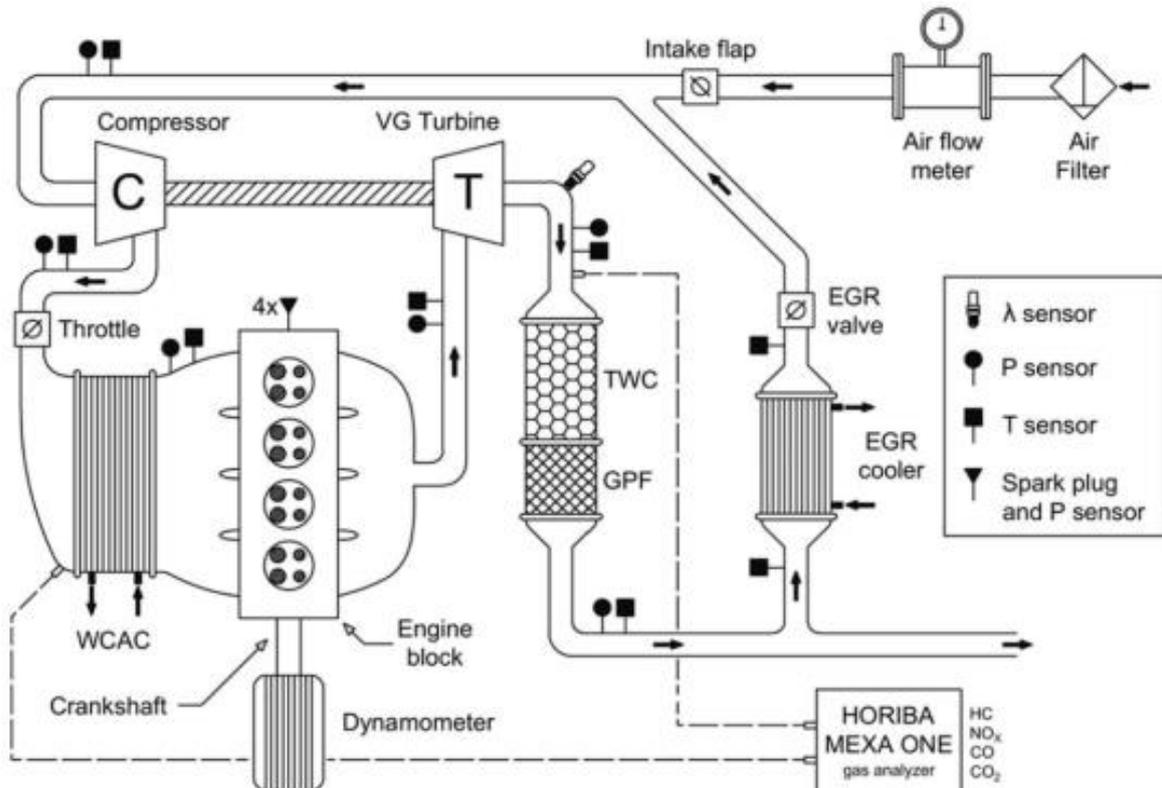
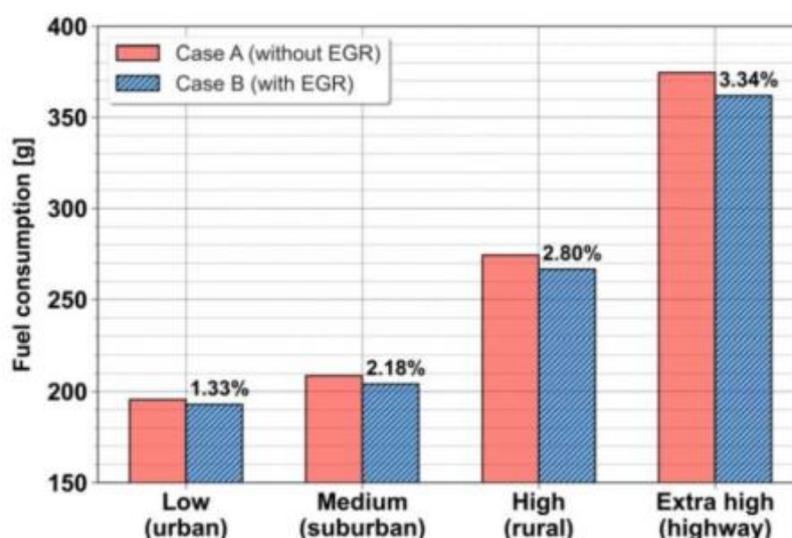


Figura 5: Esquema de la instalación experimental del modelo.

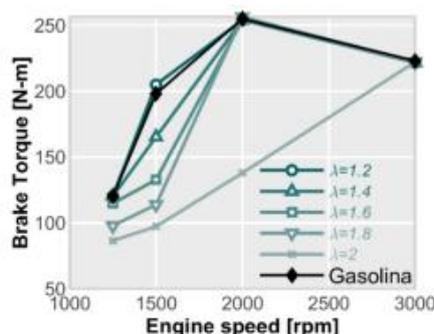
Para analizar el impacto del EGR en la eficiencia del combustible, se llevaron a cabo dos simulaciones de ciclos de homologación cuyo objetivo era cuantificar la mejora en la economía del combustible obtenida mediante la estrategia EGR. La única diferencia en la configuración del modelo de vehículo entre ambas simulaciones son los mapas utilizados para representar las emisiones contaminantes y el consumo de combustible del motor.

Las simulaciones se dividieron en dos casos: el Caso A, que simulaba el motor en funcionamiento sin EGR; y el Caso B, que incorporaba el funcionamiento del EGR. El gráfico de barras de la *Figura 6* presenta el consumo de combustible del motor en ambos casos durante cada fase del ciclo WLPT (Procedimiento Mundial Armonizado para Ensayos de Vehículos Ligeros). El ahorro de combustible conseguido con EGR en cada fase, se encuentra indicado justo encima de las barras correspondientes al caso con EGR.



*Figura 6: Consumo de combustible en Caso A (sin EGR) y Caso B (con EGR) para el sistema de propulsión convencional en cada fase del ciclo de conducción.*

El siguiente paso, tras optimizar el modelo para operación con gasolina fue introducir el cambio de combustible a hidrógeno. Para ello se dejó el motor tal y como estaba y se probó a operar con hidrógeno a distintos grados de dilución para comprobar si se alcanzaban las prestaciones de potencia máxima que ofrecía el motor con gasolina como combustible.



*Figura 7: Líneas de máxima potencia frente al par para distintos  $\lambda$*

Como se puede ver en la *Figura 7*, en este estudio se constató que a altos grados de dilución no se conseguía llegar a la máxima potencia ofrecida por el motor en su funcionamiento con gasolina. Esto suponía un problema ya que a mayor grado de dilución alcanzado menos emisiones de NOx se generaban. Solo se alcanzaba la potencia objetivo (línea negra) en  $\lambda$  iguales a 1.2, a medida que el grado de dilución aumentaba únicamente era posible llegar a esta potencia a regímenes de giro elevados.

Estos resultados llevaron a la conclusión de que se podía realizar la adaptación, pero habría que modificar el sistema del turbogrupo para alcanzar las prestaciones de potencia a las que se aspiraba.

De los cambios realizados, se destaca el redimensionamiento de la voluta y la lengua del compresor reduciendo su tamaño en un 20% respecto del original. Con esto se conseguía meter más volumen de aire aumentando así la carga y evitando la entrada en bombeo.

En el caso de la turbina, al reducir su tamaño se consigue una mayor relación de expansión y consecuentemente un mayor salto de entalpías. Esto lleva a obtener más trabajo de la turbina y por consiguiente un mayor trabajo del compresor.

Además, también se eliminó el sistema de postratamiento GPF (filtro de partículas) que incorporan los motores gasolina, ya que resulta innecesario en el modelo que opera con hidrógeno dado que no emite partículas sólidas en su combustión. Suprimiéndolo se consigue reducir hasta en un 80% la pérdida de carga, aumentando aún más la relación de expansión de la turbina. En su lugar se instaló un catalizador de tres vías.

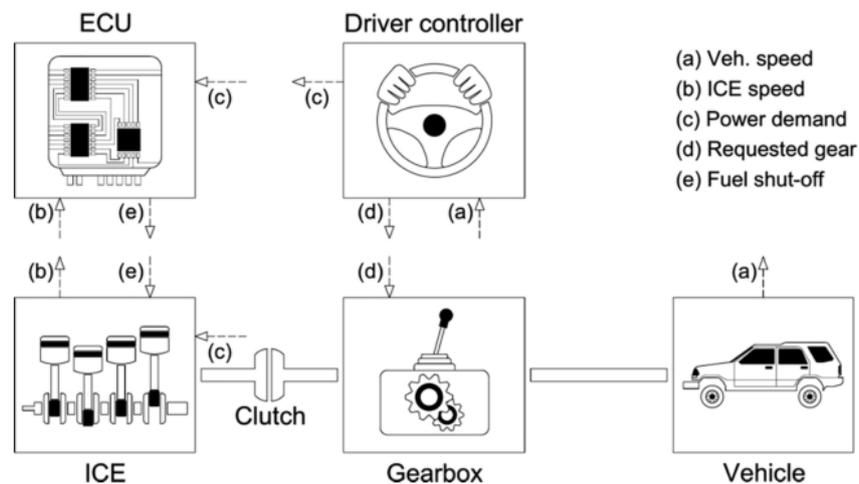
Por último, se aumentó la línea de escape en un 20%, consiguiendo así reducir de nuevo las pérdidas de carga y aumentando la relación de expansión y el trabajo de la turbina.

Habiendo realizado ya todos estos cambios, se procedió a la optimización del sistema de distribución variable (VVT).

Este proyecto parte del modelo al que ya se le han realizado todas las adaptaciones y calibraciones descritas a lo largo del apartado.

## 3.2. Descripción del modelo del vehículo

Para la simulación de ciclos de circulación se utiliza un modelo previamente validado en un proyecto anterior. Se trata de un modelo 0D de un Vehículo Utilitario Deportivo (SUV) convencional real de 2018, equipado con el motor de gasolina descrito en el apartado anterior. El modelo se desarrolló mediante el software GT-Power. El modelo del SUV convencional consta de cinco subconjuntos, denominados 'ICE', 'ECU', 'Driver controller', 'Gearbox' y 'Vehicle', como se muestra en el esquema del modelo de la *Figura 8*.



*Figura 8: Esquema del modelo de vehículo convencional utilizado.*

El submodelo 'ICE' se encarga de estimar el consumo de combustible y las emisiones del motor utilizando datos experimentales de los 16 puntos de operación seleccionados. Este submodelo también necesita otras entradas, como la geometría del motor, propiedades del combustible, demanda de potencia y la estrategia de corte de inyección de combustible. Esta última se define en la parte 'ECU'. El combustible se corta durante los eventos de frenado, si la demanda de torque es negativa y menor que el torque de fricción del motor en negativo, y durante los cambios de marcha.

En el submodelo 'ICE' se incorpora la información que le dice al vehículo que se está operando con hidrógeno como combustible. Como se ha mencionado se introducen las propiedades del combustible utilizado, así como los mapas de consumo y emisiones para los distintos puntos de funcionamiento (definidos por la BMEP) del motor. En este submodelo queda integrado el modelo de motor optimizado para las distintas estrategias propuestas.

La parte 'Driver controller' es un controlador model-based que regula la velocidad del vehículo en simulaciones dinámicas. Este submodelo calcula una referencia de demanda de torque del motor ( $T_{ref}$ ) sumando las fuerzas externas (aerodinámica, resistencia de rodaje y gravedad), el torque de inercia de toda la línea de transmisión y del vehículo, y la carga inducida por una relación de engranaje transitoria:

$$T_{ref} = \left[ \frac{F_{ae} + F_{rr} + F_g}{R_d R_t} \right] r_w + \left[ I_{it} + \frac{I_{ot}}{R_t^2} + \frac{I_d}{R_t^2} + \frac{I_a}{R_d^2 R_t^2} + \frac{M_v r_w^2}{R_d^2 R_t^2} \right] \dot{\omega}_d + \left[ \frac{I_{ot}}{R_t^3} + \frac{I_d}{R_t^3} + \frac{I_a}{R_d^2 R_t^3} + \frac{M_v r_w^2}{R_d^2 R_t^3} \right] \omega_d \dot{R}_t$$

donde  $F_{ae}$ ,  $F_{rr}$  y  $F_g$  se refieren a las fuerzas aerodinámica, resistencia a la ro-

dadura y gravedad. La relación del diferencial, la relación de transmisión y el radio de la rueda están representados por los términos  $R_d$ ,  $R_t$  y  $r_w$ , respectivamente. Los momentos de inercia de la entrada y salida de la transmisión, el eje de transmisión y los ejes están simbolizados por  $I_{it}$ ,  $I_{ot}$ ,  $I_d$  e  $I_a$ ; mientras que  $M_v$  y  $\omega_d$  son la masa del vehículo y la velocidad de la línea de transmisión en el lado de salida del embrague. Una vez calculada la referencia de demanda de torque, se corrige con un controlador PI para minimizar el error entre la velocidad real y la deseada del vehículo. Según la velocidad del motor, también se especifica una estrategia de cambio de marcha en el 'Driver controller' para gestionar la caja de cambios. Finalmente, la aerodinámica y geometría del vehículo, junto con las características de la transmisión, se definen en los subconjuntos 'Vehicle' y 'Gearbox'.

Las principales especificaciones del modelo de SUV convencional seleccionado, proporcionadas por la página web del fabricante, se recogen en la *Tabla 3*.

Características	Descripción
Masa de vehículo, pasajeros y carga	1500 kg
Coefficiente de resistencia aerodinámica del vehículo	0.33
Área frontal	2.38 m <sup>2</sup>
Ruedas	215/60 R17
Caja de cambios	Manual 6-velocidades
Relaciones de transmisión	4.35, 2.48, 1.55, 1.14, 0.89 y 0.75
Relación diferencial	3.6

*Tabla 3: Especificaciones del SUV seleccionado.*

### 3.3. Herramientas de procesado

#### GT-Suite

GT-Suite, software desarrollado por Gamma Technologies, es la herramienta de simulación más destacada en la industria, con capacidades y bibliotecas orientadas a una amplia gama de aplicaciones e industrias. Proporciona a los ingenieros funcionalidades que abarcan desde el diseño conceptual rápido hasta análisis detallados de sistemas, subsistemas o componentes, optimización de diseño y análisis de causas raíz.

Las dos herramientas más utilizadas para el estudio desarrollado han sido GT-POWER Engine Simulation Software y GT-POST (su herramienta de post-procesado). GT-POWER es el software de simulación de funcionamiento estándar de motor utilizado por los principales fabricantes de motores y OEM de vehículos. Este se utiliza para predecir parámetros de funcionamiento del motor como potencia, torque, flujo de aire, eficiencia

volumétrica, consumo de combustible, emisiones contaminantes generadas, rendimiento y ajuste del turbocompresor y pérdidas de bombeo entre otros.

Otra aplicación de GT-Suite utilizada en este trabajo es GT-RealDrive. Esta es una aplicación de navegación para simulación de vehículos totalmente integrada en GT-Suite. Permite crear rutas a lo largo de carreteras públicas en todo el mundo considerando: densidad de tráfico, señales de tráfico, preferencias del conductor y elevación para capturar las dinámicas de arranque y parada de la conducción real.

## MATLAB

MATLAB es un software desarrollado por MathWorks de programación y cálculo numérico con un lenguaje de alto nivel para cálculos científicos y de ingeniería. Es utilizado en ingeniería para analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos. El lenguaje de MATLAB, basado en matrices, es la forma más intuitiva para expresar matemáticas computacionales. Sus capacidades gráficas integradas permiten visualizar datos y extraer información fácilmente.

Este software incluye una alta gama de funciones y herramientas predefinidas para realizar cálculos numéricos, además, es especialmente eficiente en el manejo de operaciones matriciales, esto reduce notablemente el tiempo empleado en tratamiento de datos.

En este trabajo se ha hecho uso de MATLAB para post-procesado de los datos obtenidos en GT-POWER. Mediante el desarrollo de códigos que permitieran la importación de estos datos y su tratamiento, se consiguió mostrar y analizar gráficamente los resultados del problema planteado en forma de mapas. Así pues, se logró una mayor comprensión de dichos resultados.

## Microsoft Excel

Microsoft Excel es el conocido programa del paquete Office desarrollado por Microsoft que utiliza hojas de cálculo como herramienta avanzada de análisis y visualización de datos. Este permite trabajar fácilmente con información analizable, recoger y organizar datos gracias a sus tablas dinámicas y generar gráficos a partir de estos, así como realizar cálculos aritméticos básicos o generar funciones matemáticas más complejas y utilizar funciones estadísticas.

En este estudio se ha utilizado Excel para agrupar datos de manera ordenada, realizar cálculos básicos y crear gráficos que ayuden a visualizar los resultados obtenidos del programa GT-POWER. Además, también ha sido una herramienta esencial para la organización de los datos necesarios para la generación de las rutas utilizadas en la simulación de ciclos de conducción.

## GPS Visualizer

GPS Visualizer es una herramienta en línea que genera mapas y perfiles a partir de datos geográficos. Este puede leer archivos de datos en numerosos formatos y convertirlos al formato deseado (GPS, KML, KMZ, .txt, etc.).

GPS Visualizer se ha utilizado en este proyecto para obtener el perfil de elevación y transformar los datos de la ruta, previamente generada gracias a GT-RealDrive y Google Earth, al formato requerido por GT-POWER para la simulación de los ciclos de conducción.

## Google Earth Pro

Google Earth es un Sistema de información geográfica elaborado a partir de datos cartográficos e imágenes satelitales que permite la creación de marcadores, líneas, polígonos y rutas entre otras funciones. Este software da la posibilidad de exportar dichas rutas con información de latitud, longitud y elevación en formatos KML y KMZ (utilizados en este proyecto).

Como se explicará más detalladamente en el apartado 4.2, Google Earth ha sido de gran utilidad para completar los datos de la ruta diseñada en GT-RealDrive.

## APARTADO 4

### METODOLOGÍA

- 4.1. Optimización en condiciones de motor de la relación aire-combustible para diferentes regímenes de giro y par.
- 4.2. Diseño de rutas y simulación de ciclos de conducción.

## 4. METODOLOGÍA

Como se ha explicado anteriormente, este trabajo parte de un modelo de motor virtual ya validado y a partir de este se procede a la optimización de las prestaciones de dicho motor a través de estrategias de control de aire. El trabajo se ha dividido en dos partes bien diferenciadas:

### 4.1. Optimización en condiciones de motor de la relación aire-combustible para diferentes regímenes de giro y par

En primer lugar, se procedió a la optimización en condiciones de motor de la relación aire-combustible mediante estrategias de control de aire. Para ello, se utilizó el patrón de funcionamiento recogido en la *Tabla 4* ya optimizado para el modelo de motor utilizado:

Speed [Nm]	Target Torque [Nm]	IVO_ECU_opt [CAD]	EVC_ECU_opt [CAD]
1250	42	40	29
1250	120	11	8
1500	22	15	40
1500	62	40	18
1500	124	10	7
1500	220	13	0
2000	22	40	20
2000	62	40	15
2000	103	10	7
2000	157	0	0
2000	254	8	0
2500	31	40	22
2500	62	0	5
2500	145	0	0
3000	124	9	0
3000	223	0	0

*Tabla 4: Modelo de funcionamiento de motor para simulación en GT-Suite.*

A partir de este modelo, se simularon 8 condiciones que se corresponden con diferentes relaciones aire-combustible para cada uno de los puntos de funcionamiento anteriores.

Por medio de iteraciones, se optimizó su funcionamiento a través del avance del salto de la chispa para garantizar un fasado de la combustión (CA50) que maximizar a el rendimiento indicado. El CA50 es un parámetro que nos sirve para asegurar una buena combustión, en motores de encendido provocado (MEP) es necesario adelantar el encendido para que la combustión se produzca cuando el pistón alcance el PMS (punto de máxima compresión) consiguiendo así la máxima eficiencia de esta. Este avance depende principalmente de la velocidad del pistón y las condiciones de la mezcla.

<b>RPMxPAR</b>	<b>Lambda</b>	<b>CA50</b>
<b>caso 1</b>	1.8	-
<b>caso 2</b>	2	-
<b>caso 3</b>	2.2	-
<b>caso 4</b>	2.4	-
<b>caso 5</b>	2.6	-
<b>caso 6</b>	2.8	-
<b>caso 7</b>	3	-
<b>caso 8</b>	3.2	-

Tabla 5: Puntos de funcionamiento escogidos para optimización de prestaciones del modelo de motor.

La *Tabla 5* muestra la estructura de la recogida de datos que se realizó. Para cada modo de funcionamiento, definidos por revoluciones y par de giro del motor, se itera haciendo uso del modelo de motor en el programa GT-Power hasta lograr el CA50 óptimo en cada punto de funcionamiento de los estudiados. En los puntos en los que no se lograba la convergencia de la simulación se procedió al descarte, ya que esto llevaba a concluir que en esas condiciones de funcionamiento el motor no conseguía llegar al par y las revoluciones por minuto requeridas. De esta manera se reducía el número de casos a analizar.

Una vez optimizado el CA50, el siguiente paso fue encontrar, para cada modo de funcionamiento, el punto de funcionamiento que maximiza la eficiencia del motor, reduciendo así el consumo específico de combustible (BSFC), y, por otro lado, el que minimiza las emisiones de NOx. Este fue un proceso más sencillo, pues solo había que comparar los resultados de eficiencia, BSFC y emisiones contaminantes para cada escenario y seleccionar el punto de funcionamiento óptimo para cada uno de estos tres parámetros.

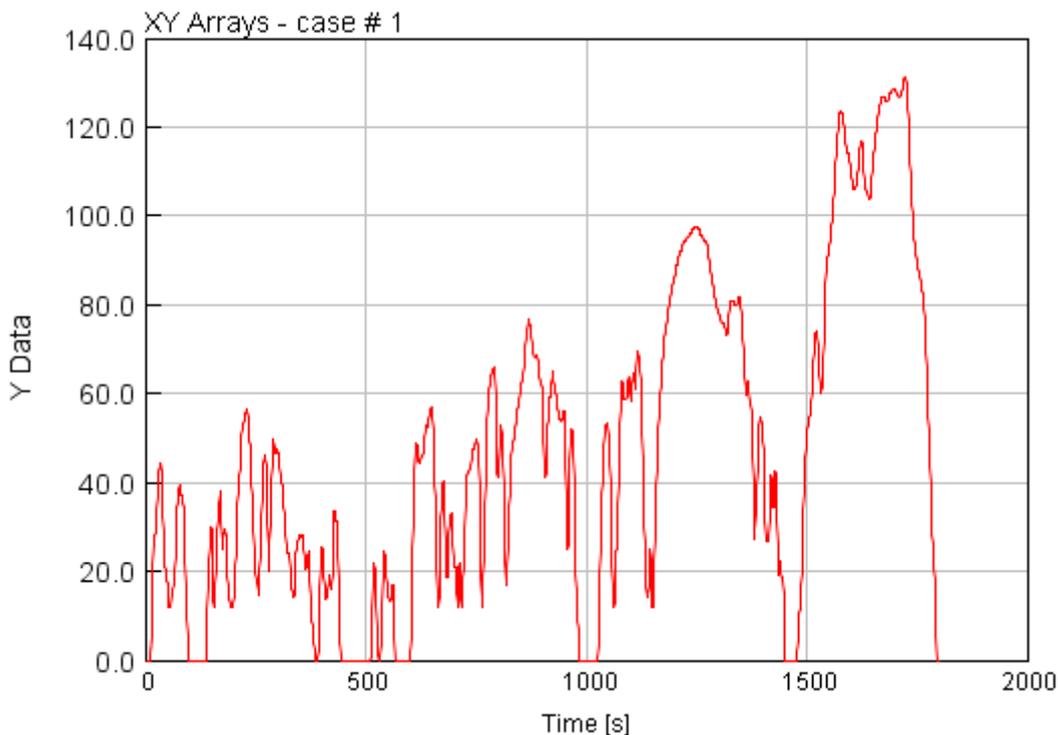
Estos puntos de funcionamiento se llevaron a Matlab y se elaboraron los correspondientes mapas de funcionamiento para el modelo de motor diferenciados en tres situaciones:

- El caso de referencia. En este se tomó una relación aire-combustible referencia para MEP. La relación escogida fue  $\lambda=2$  pues, en el TFG del que parte este trabajo, se comprobó que ese valor puede proporcionar cifras de emisiones asumibles acorde con la normativa y con la tecnología actual sin necesidad de realizar adaptaciones demasiado costosas.
- El caso de consumo específico óptimo.
- El caso de emisiones de NOx óptimas.

Con la obtención de dichos mapas se completaría la fase de optimización de la relación aire-combustible en condiciones de motor. Los mapas quedan integrados en el modelo de vehículo utilizado para las simulaciones de ciclos de conducción.

## 4.2. Diseño de rutas y simulación de ciclos de conducción

Las rutas para las simulaciones de ciclos de conducción se quisieron diseñar de la manera más realista posible. El programa GT-suite proporcionaba varios ciclos WLTC (Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Cycles) para simulación. Estos son los ciclos estándar utilizados a nivel mundial por los fabricantes de automóviles para medir el consumo de combustible y las emisiones contaminantes de turismos y vehículos comerciales ligeros. No obstante, es bien sabido entre los consumidores que, en la práctica, estos ciclos no ofrecen resultados que se ajusten del todo a la realidad. En este caso y a modo de comparativa con los ciclos reales se toma el WLTC 3 por ser el más adecuado para el tipo de vehículo del modelo (masa en vacío > 34kg). En la *Figura 9* se muestra el perfil de velocidad correspondiente al ciclo de conducción estándar WLTC 3.



*Figura 9: Perfil de velocidad ciclo de conducción WLTC 3.*

Al margen de simular el ciclo WLTC 3, se crearon dos ciclos de conducción representativos de dos situaciones distintas: una ruta por carretera de larga distancia, en este caso se tomó el itinerario desde el Aeropuerto de Manises (Valencia) hasta la Universidad de Madrid; y otra ruta por ciudad de media distancia, en este segundo caso se tomó el trayecto desde el Aeropuerto de Manises (Valencia) a la Universidad Politécnica de Valencia.

Lo que más motivaba este diseño era intentar conseguir que, principalmente en el ciclo por ciudad, se tuviera en cuenta las variaciones de velocidad en una ruta real que pueden estar causadas por semáforos, pasos de peatones y diversas situaciones cotidianas, y comprobar cómo esto repercute en el consumo y las emisiones contaminantes del vehículo.

Es por esto por lo que se utilizó la herramienta GT-RealDrive del mismo programa para el diseño de ciclos más realistas, ya que tenía en cuenta todo lo mencionado anteriormente. Esta herramienta proporciona, a partir de un punto de origen y otro de destino, un perfil de

velocidad casi completo en formato GPS a excepción del dato de la elevación en cada waypoint.

Para obtener este último parámetro se hizo uso del programa Google Earth Pro, en el que se importaron los datos de latitud y longitud de cada waypoint consiguiendo así la ruta en formato KML con datos de la elevación de cada punto. A continuación, el archivo KML se importó en la aplicación online GPS Visualizer, que es capaz de extraer de este archivo una representación gráfica del perfil de elevación y, lo que realmente se necesitaba para completar las rutas, un archivo Excel que incluía cada punto y su altitud.

Por último, se creó en GT-Suite el ciclo de conducción introduciendo todos los datos anteriormente obtenidos en el formato que muestra la *Figura 10*.

Attri...	Time	Latitude	Longitude	Elevation
0	s	deg	deg	m
1	0.0	39.491103	-0.476371	54.9
2	9.357142857	39.491529	-0.47663	55.0
3	11.375	39.491618	-0.476694	55.0
4	17.39285714	39.491752	-0.477045	55.1
5	57.19642857	39.492638	-0.479372	56.5
6	58.55357143	39.492648	-0.47946	56.5
7	60.28571429	39.492642	-0.479573	57.0
8	61.33928571	39.492644	-0.479641	57.2
9	77.96428571	39.493015	-0.480613	58.2
10	91.16910499	39.493898	-0.480051	58.0
11	118.849105	39.494456	-0.479696	58.0
12	121.969105	39.494499	-0.479623	58.0
13	125.809105	39.494508	-0.479512	58.0
14	167.329105	39.494096	-0.478428	57.0
15	215.169105	39.493621	-0.477179	56.9
16	218.689105	39.493628	-0.477078	56.5
17	221.889105	39.493671	-0.477003	56.4
18	240.329105	39.494043	-0.476768	56.7
19	242.969105	39.494086	-0.476714	56.8
20	245.689105	39.494093	-0.476635	56.7

*Figura 10: Introducción de datos para simulación de ciclos en GT-Suite.*

Se muestran los perfiles de velocidad de los ciclos de conducción diseñados por ciudad y por carretera en las *Figuras 11 y 12* correspondientemente.

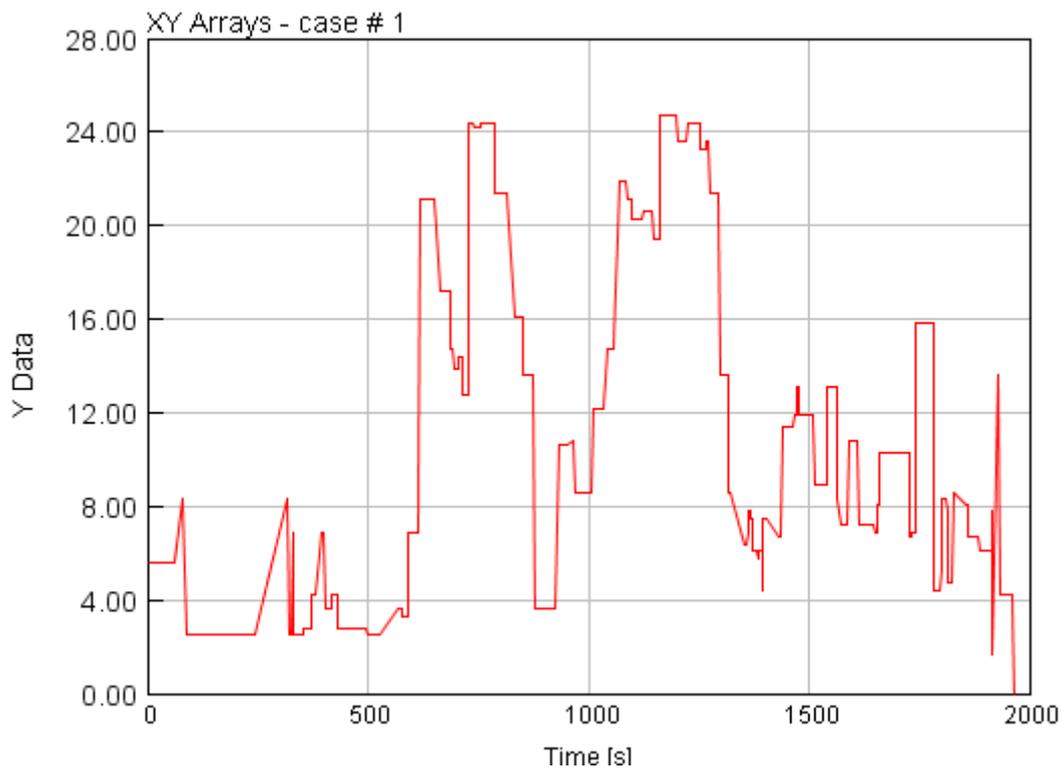


Figura 11: Perfil de velocidad del ciclo de conducción Aeropuerto VLC-UPV.

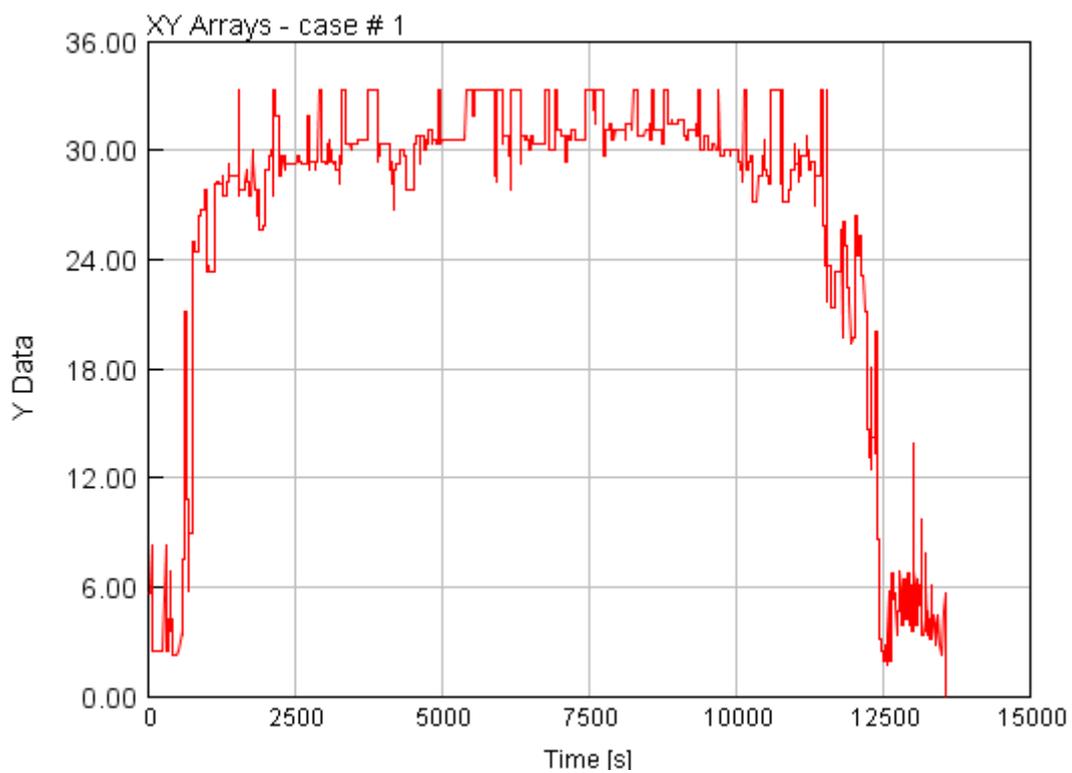


Figura 12: Perfil de velocidad del ciclo de conducción Aeropuerto VLC-UM.

Una vez se tuvieron listos los tres ciclos, se procedió a ejecutar las simulaciones y la correspondiente recogida de resultados para su evaluación.

## APARTADO 5

### RESULTADOS

- 5.1. Resultados de la optimización en condiciones de motor.
- 5.2. Análisis en condiciones de vehículo.
  - a. Ciclo de conducción estándar.
  - b. Ciclos de conducción real.
  - c. Comparativa de los anteriores.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Resultados de la optimización en condiciones de motor

Como se ha explicado en el Apartado 4.1, el primer paso fue realizar las iteraciones necesarias para encontrar el CA50 que optimizaba la combustión en cada caso de los anteriormente presentados. Estos resultados se muestran en el Anexo I.

A partir de estos datos y con la combustión ya optimizada, se llevaron a cabo las simulaciones pertinentes para obtener datos de eficiencia, consumo específico y emisiones de NOx del motor a diferentes relaciones aire-combustible. Para facilitar la interpretación de los resultados obtenidos, se elaboraron las gráficas que aparecen en las Figuras 13 a 20.

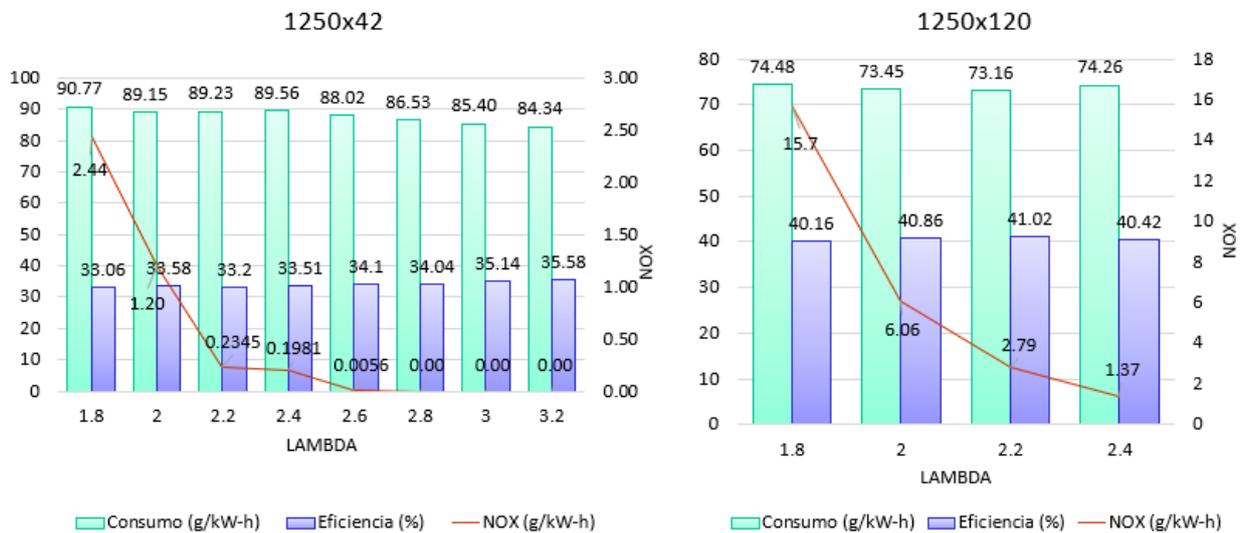


Figura 13: Resultados de las simulaciones a 1250 rpm.

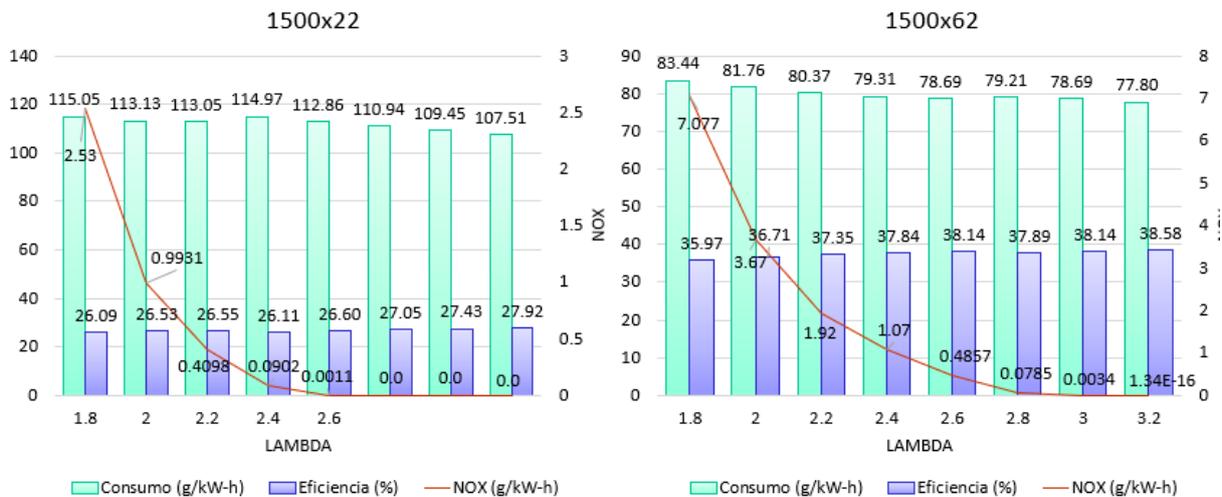


Figura 14: Resultados de las simulaciones a 1500 rpm.

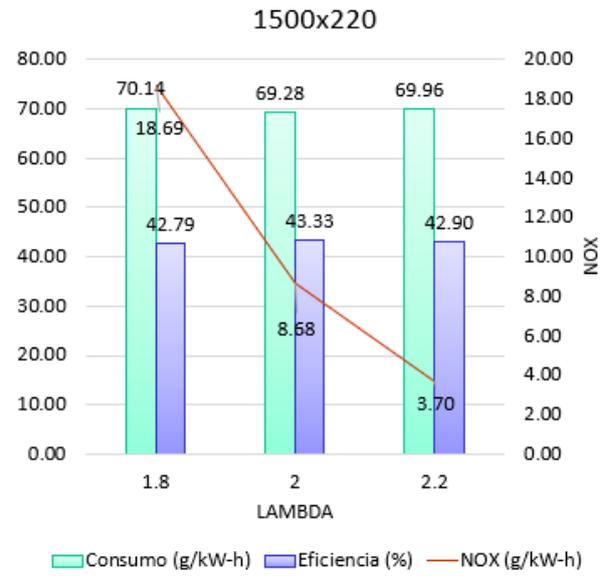
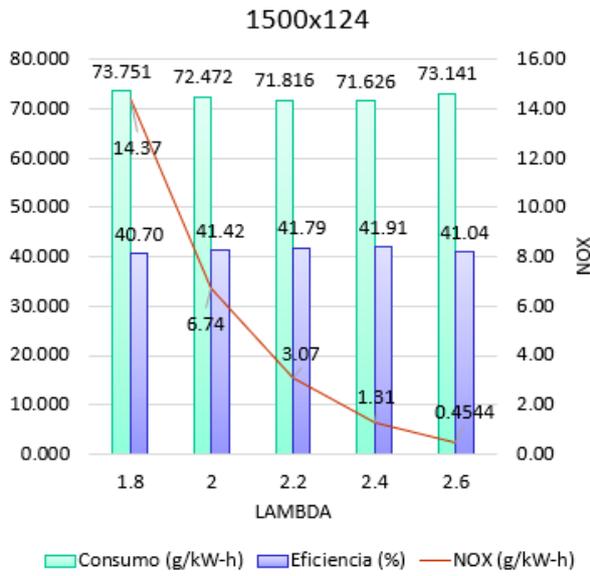


Figura 15: Resultados de las simulaciones a 1500 rpm.

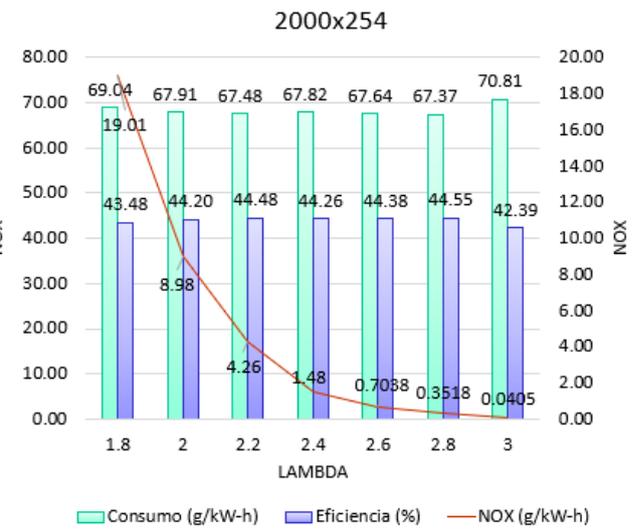
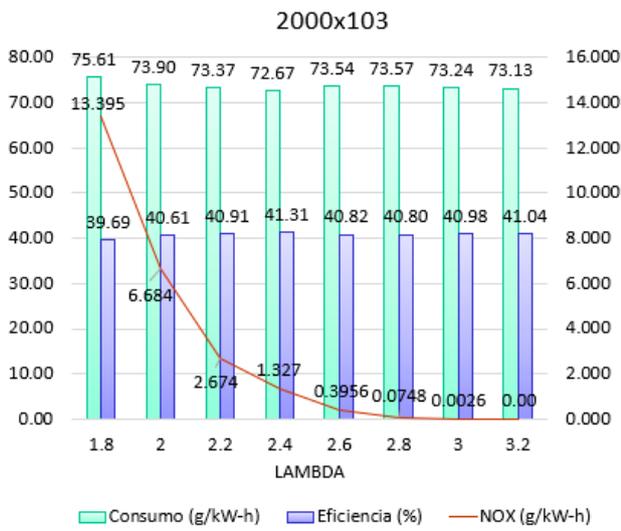


Figura 16: Resultados de las simulaciones a 2000 rpm.

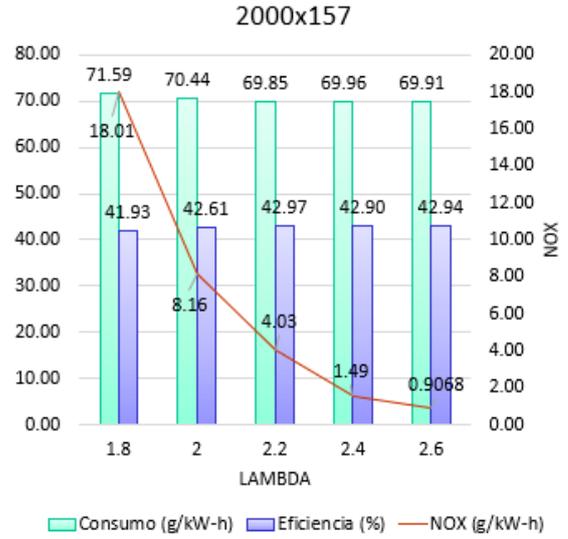
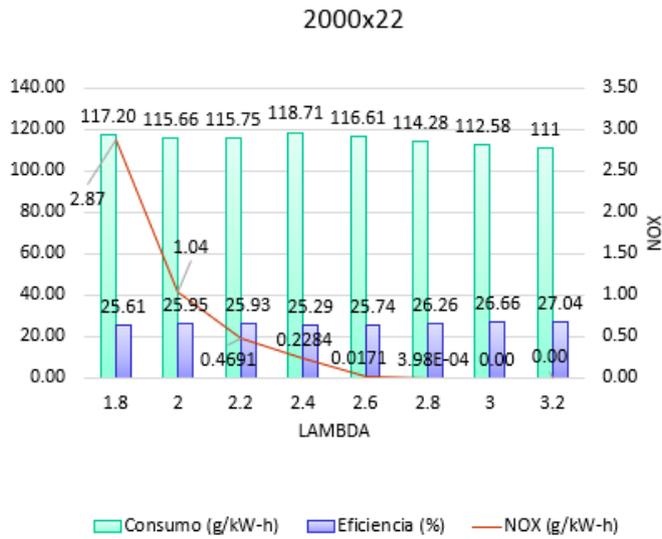


Figura 17: Resultados de las simulaciones a 2000 rpm.

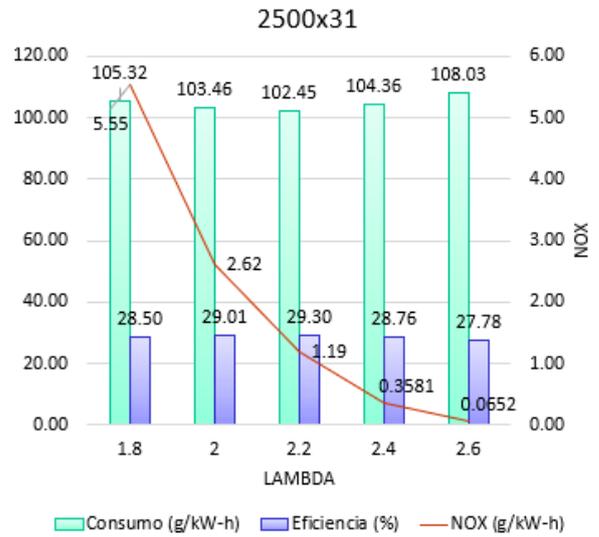
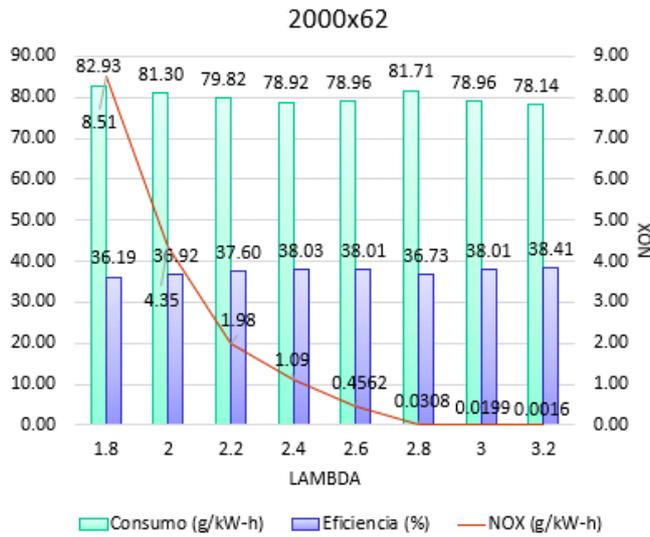


Figura 18: Resultados de las simulaciones a 2000 y 2500 rpm.

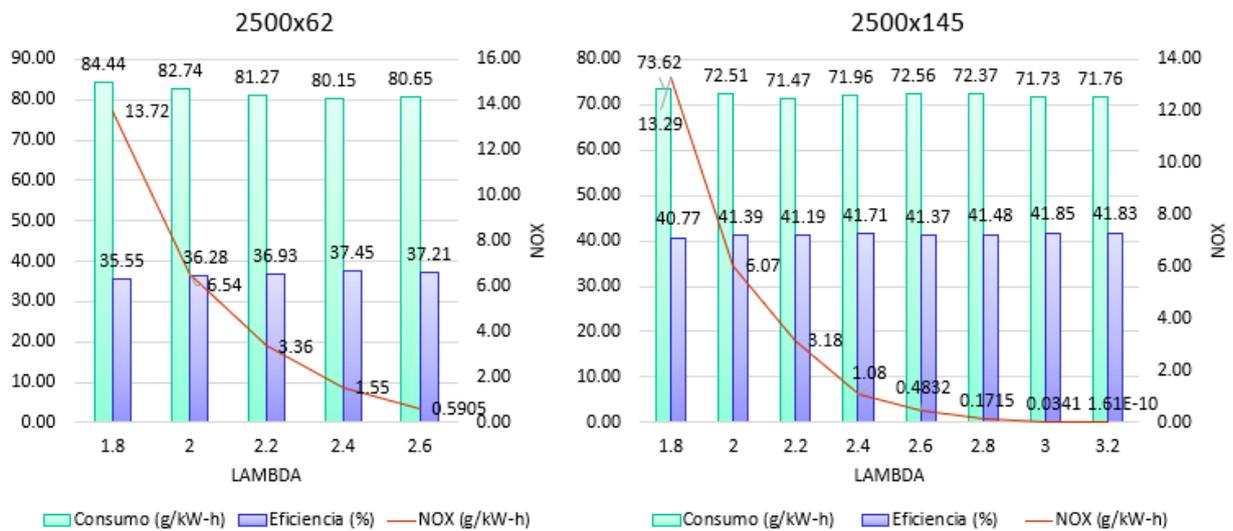


Figura 19: Resultados de las simulaciones a 2500 rpm.

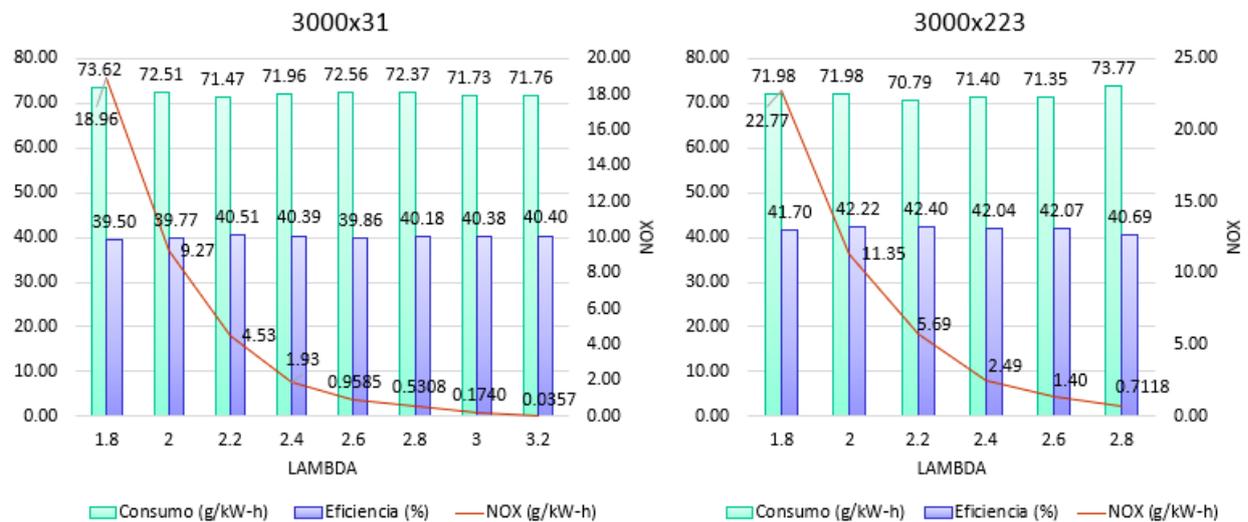


Figura 20: Resultados de las simulaciones a 3000 rpm.

De estos resultados, se recogieron para cada caso dos puntos de funcionamiento: el que optimizaba el BSFC y el que optimizaba las emisiones de NOx. En algunos casos ambos puntos coinciden, especialmente a baja carga, pero a medida que aumenta la carga los puntos óptimos para cada situación deseada comienzan a ser más dispares.

Los puntos óptimos de funcionamiento obtenidos para cada escenario quedan reflejados en las *Tablas 6 y 7*.

<b>Óptimo a BSFC</b>					
<b>RPM</b>	<b>PAR</b>	<b>BMEP</b>	<b>BSFC</b>	<b>NOx</b>	<b>Lambda</b>
1250	42	3.9725502	84.34	0	3.2
1250	120	11.243227	73.16	2.79	2.2
1500	22	2.0755336	107.51	0	3.2
1500	62	5.836164	77.8	1.34E-16	3.2
1500	124	11.696614	71.626	1.305	2.4
1500	220	20.715902	69.96	3.705	2.2
2000	22	2.0732536	111	0	3.2
2000	62	5.84236	78.14	1.63E-03	3.2
2000	103	9.489334	72.67	1.327	2.4
2000	157	14.764261	69.85	4.034	2.2
2000	254	23.854443	67.37	0.3518	2.8
2500	31	2.9251647	102.445	1.1940956	2.2
2500	62	5.848704	80.155	1.5503136	2.4
2500	145	13.595965	71.473	3.1754172	2.2
3000	124	11.635862	74.296425	0.035720397	3.2
3000	223	20.965193	70.78696	5.6931734	2.2

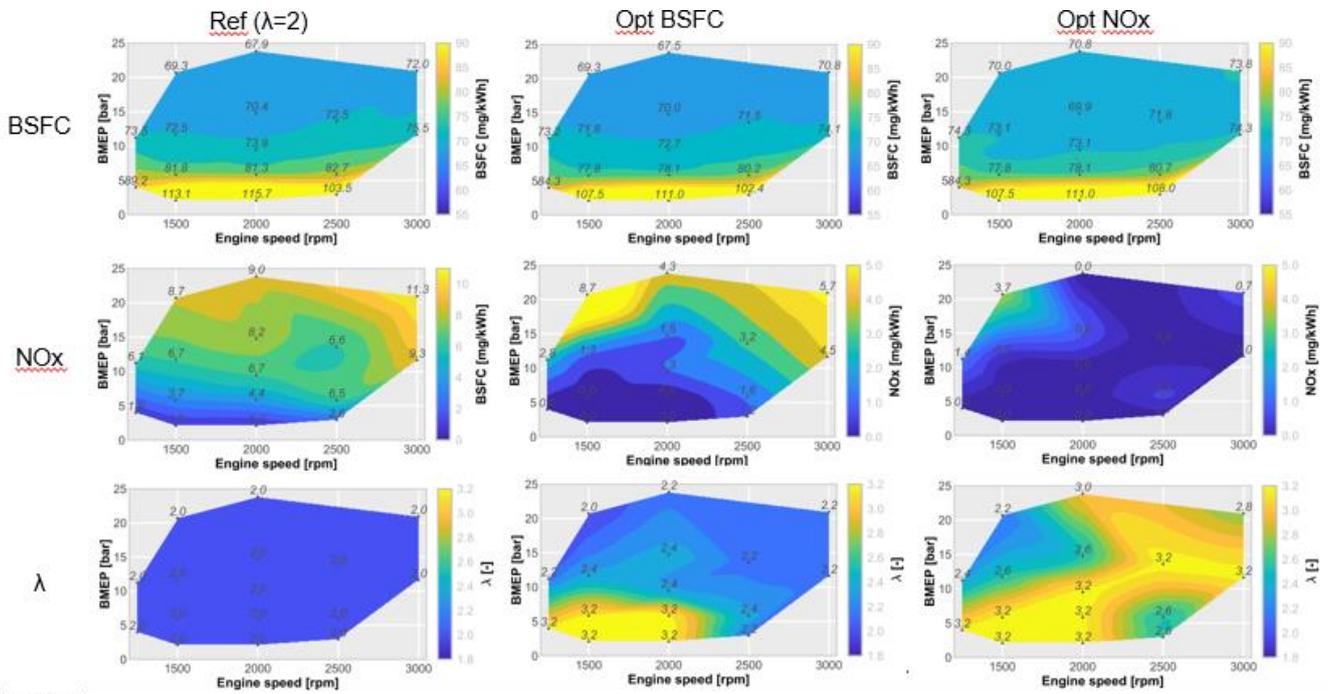
*Tabla 6: Puntos de funcionamiento a óptimo BSFC para el modelo de motor.*

<b>Óptimo a NOx</b>					
<b>RPM</b>	<b>PAR</b>	<b>BMEP</b>	<b>BSFC</b>	<b>NOx</b>	<b>Lambda</b>
1250	42	3.9725502	84.34	0	3.2
1250	120	10.531517	40.42	1.37E+00	2.4
1500	22	2.0755336	107.51	0	3.2
1500	62	5.836164	77.8	1.34E-16	3.2
1500	124	11.696087	73.141	0.4544	2.6
1500	220	20.715902	69.96	3.705	2.2
2000	22	2.0732536	111	0	3.2
2000	62	5.84236	78.14	1.63E-03	3.2
2000	103	9.71503	73.13	0	3.2
2000	157	14.771911	69.91	0.9068	2.6
2000	254	23.088593	70.81	0.0405	3
2500	31	2.9267495	108.032	0.06515797	2.6
2500	62	5.8282886	80.653	0.5905369	2.6
2500	145	13.900331	71.761	1.61E-10	3.2
3000	124	11.6359	74.296425	0.035720397	3.2
3000	223	20.2982	73.768776	0.711849	2.8

*Tabla 7: Puntos de funcionamiento a óptimos NOx para el modelo de motor.*

El siguiente paso, como ya se explicó en el Apartado 4.1 fue obtener los mapas de funcionamiento del motor a partir de estos puntos.

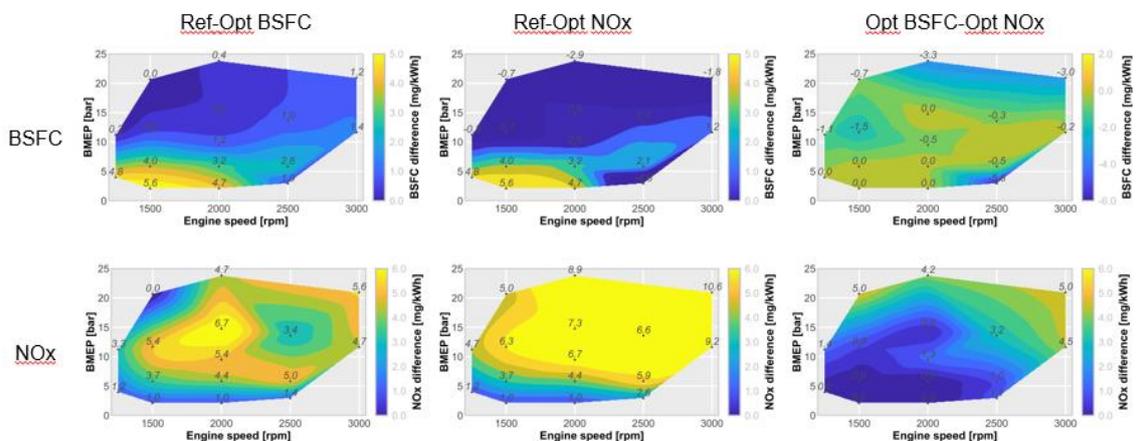
Seguidamente, se muestran en la *Figura 21* los mapas de funcionamiento obtenidos en MATLAB a partir de los resultados de las *Tablas 6 y 7*.



*Figura 21: Mapas de funcionamiento en los distintos escenarios.*

Los mapas se disponen en forma matricial para facilitar su comprensión, así es posible comparar la relación de cada escenario (el de referencia, el de óptimo BSFC y el de óptimas emisiones de NOx) con los tres parámetros que se desean estudiar: BSFC, emisiones de NOx y relación aire-combustible ( $\lambda$ ) que los optimiza.

En los mapas de funcionamiento a óptimo BSFC, se alcanzan  $\lambda$  elevados para cargas bajas mientras que a altas cargas la relación aire-combustible a la que se llega es mucho menor. Esto ocurre porque el turbocompresor no es capaz de conseguir la potencia requerida sin repercutir en el consumo de combustible.



*Figura 22: Mapas de diferencia de funcionamiento entre estrategias.*

En la *Figura 22* se representan las diferencias entre cada uno de los casos mapeados en la *Figura 21*. Analizando estas diferencias se puede comprobar también que, entre el caso de referencia y los dos casos optimizados, hay una notable disminución en la cantidad de emisiones contaminantes producidas (altas diferencias). En cuanto al consumo, su disminución en los casos optimizados respecto al caso de referencia es más relevante a baja carga, reduciéndose la diferencia entre ellos a medida que la carga va aumentando.

Con estos resultados el motor quedaba completamente optimizado para los dos escenarios deseados y se pasó a evaluar el impacto que tenía la incorporación de este motor a nivel vehículo.

## 5.2. Análisis de condiciones de vehículo.

Como se expuso en el Apartado 4.2, el análisis del impacto de la adaptación del motor a nivel vehículo se realizó mediante dos tipos de simulación de ciclos de circulación: ciclo de conducción estándar (WLTC 3) y ciclo de conducción real.

### a. Ciclo de conducción estándar (WLTC 3).

En primer lugar, se obtuvieron los resultados del ciclo estándar WLTC Class 3 predefinido en GT-Power. La *Tabla 8* muestra los resultados obtenidos de consumo total de combustible, consumo específico de combustible medio, emisiones totales de NOx, emisiones específicas de NOx medias y energía total producida.

	<b>Caso Referencia</b>	<b>BSFC óptimo</b>	<b>NOx óptimo</b>
<b>Consumo total de combustible [g]</b>	1316.0731	1296.9631	1350.2947
<b>Consumo específico promedio [g/kW-h]</b>	72.10239	71.05543	73.97725
<b>Emisiones totales de NOx [g]</b>	191.6171	97.75691	11.812173
<b>Emisiones específicas de NOx BSNOx [g/kW-h]</b>	9.9963455	5.086027	0.6672162
<b>Consumo de energía total [KJ]</b>	92218.57	89925.37	96325.14

*Tabla 8: Resultados de simulación de ciclo de conducción estándar WLTC 3.*

En los resultados mostrados para el ciclo de conducción estándar se puede ver que, en ambos casos optimizados, las emisiones de NOx se reducen notablemente. Si bien esto es así, es evidente que para cada caso el parámetro que más se reduce es el que se trata de optimizar. Así el caso de óptimos NOx es el que más reduce las emisiones, pero a cambio el consumo específico aumenta. Sería necesario encontrar un compromiso entre óptimas emisiones de NOx y óptimo BSFC.

#### b. Ciclo de conducción real.

A continuación, se procedió a recoger los resultados de la simulación de los dos ciclos de conducción real diseñados.

#### Resultados de la simulación del ciclo de conducción de la ruta Aeropuerto de Valencia-UPV

	<b>Caso Referencia</b>	<b>BSFC óptimo</b>	<b>NOx óptimo</b>
<b>Consumo total de combustible [g]</b>	298.6074	287.95856	290.6013
<b>Consumo específico promedio [g/kW-h]</b>	148.12454	142.8422	144.1531
<b>Emisiones totales de NOx [g]</b>	11.25127	2.6490915	0.44429627
<b>Emisiones específicas de NOx BSNOx [g/kW-h]</b>	5.4549465	0.7181416	0.16208762
<b>Consumo de energía total [KJ]</b>	28575.57	27297.713	27614.838

*Tabla 9: Resultados de simulación de ciclo de conducción real interurbano.*

Se puede observar en la *Tabla 9* que, para el ciclo interurbano, la reducción de emisiones de NOx se hace aún más destacable en los casos optimizados respecto del ciclo estándar. Además, las diferencias de consumo específico y emisiones contaminantes entre los casos optimizados disminuyen en gran medida. Como se puede ver no solo las emisiones y el consumo medio baja, si no que sus totales son también menores que en el caso de referencia.

#### Ciclo de conducción de la ruta Aeropuerto de Valencia-UM

	<b>Caso Referencia</b>	<b>BSFC óptimo</b>	<b>NOx óptimo</b>
<b>Consumo total de combustible [g]</b>	4676.681	4550.3325	4578.8906
<b>Consumo específico promedio [g/kW-h]</b>	81.290825	79.09462	79.59103
<b>Emisiones totales de NOx [g]</b>	359.50134	90.523865	14.2665415
<b>Emisiones específicas de NOx BSNOx [g/kW-h]</b>	5.835765	1.2001891	0.20364633
<b>Consumo de energía total [KJ]</b>	354092.84	338931.06	342358.03

*Tabla 10: Resultados de simulación de ciclo de conducción real por carretera.*

En la *Tabla 10* se muestra el último ciclo simulado. De sus resultados se puede destacar que al igual que en el ciclo real por ciudad, aparece un descenso importante en las emisiones de NOx producidas en los casos optimizados, mientras que la diferencia en consumo específico, aunque también existe, no es tan vasta.

### c. Comparativa de los anteriores.

Los ciclos de conducción estándar dan una visión cualitativa de qué estrategia va a ser la mejor para lograr el objetivo de llegar al compromiso entre óptimo consumo de combustible y óptimas emisiones de NOx. Pero los resultados obtenidos no son cuantitativos, no se podrá dar un valor de alcance estimado que se ajuste a la realidad, mientras que con los resultados de la conducción real esto sí será posible. Es decir, en lo relativo a los escenarios los resultados son similares, pero el ciclo real proporciona una estimación más acercada a la realidad del consumo específico y las emisiones generadas en el vehículo en un ciclo interurbano y en otro por carretera (larga distancia).

Atendiendo a los casos reales, se puede concluir que las optimizaciones se han ejecutado satisfactoriamente, ya que en ambos casos tanto el consumo específico de combustible como las emisiones contaminantes se han reducido con respecto al caso de referencia. Ahora bien, habrá que decidir cuál es la estrategia que se desea tomar, la que minimiza el consumo específico o la que minimiza las emisiones de NOx.

Comparando las prestaciones ofrecidas en ambos ciclos, se puede percibir que la diferencia de los resultados obtenidos de consumo específico de combustible entre los dos casos de optimización no es demasiado significativa. En cuanto a las emisiones contaminantes, estas se ven bastante más afectadas cuando la estrategia no es minimizarlas pues, como se ha podido apreciar en la obtención de resultados, las emisiones totales producidas en ambos ciclos son 6 veces mayores cuando se optimiza el consumo específico de combustible que en el caso de optimizar las emisiones de NOx.

### d. Aplicación en la realidad.

En cuanto a la aplicación práctica de este modelo, se ha buscado obtener el alcance aproximado que proporcionaría. Para ello, se comparan los valores del consumo de combustible obtenidos en el Apartado 5.2 con la capacidad del tanque de almacenamiento de combustible de la tecnología existente. El modelo actual de vehículo que más se asemeja al estudiado en el proyecto es el Hyundai Nexu, que utiliza pila de hidrógeno y por tanto incorpora tanques del mismo combustible. La capacidad que especifica el fabricante en su página Web para estos tanques de combustible es de 156.6L o 6.3kg de hidrógeno. En esa misma línea, da los datos de alcance máximo de 666km (bajo ciclo WLPT) y de consumo de 1kg de hidrógeno a los 100km recorridos.

Examinando los resultados obtenidos, el consumo que nos ofrecería el ciclo de conducción real optimizado para mínimas emisiones en la ruta más larga sería de 4.58kg o 117.1L aproximadamente, por lo que un trayecto Valencia-Madrid podría realizarse sin problema con un solo repostaje. No obstante, si se calcula el consumo a los 100km recorridos del modelo bajo ciclo WLPT el resultado es de 1.25kg de hidrógeno aproximadamente, o lo que es lo mismo, sería mayor que el brindado por la tecnología actual. De igual manera, para conseguir con el modelo del estudio el alcance máximo proporcionado por el vehículo existente seleccionado, sería necesario un tanque de 220.4L de capacidad como mínimo. Este modelo con el tanque de 156.6L de la tecnología actual proporcionaría un alcance máximo de unos 473.3 km (la obtención de estos datos queda explicada en el Anexo II).

## APARTADO 6

### CONCLUSIONES

## 6. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha desarrollado un estudio numérico de las prestaciones y emisiones contaminantes de un vehículo que integra un motor de combustión interna alternativo adaptado para el uso de hidrógeno como combustible. En este sentido, la operación del motor se ha optimizado para maximizar la eficiencia térmica y minimizar las emisiones contaminantes. Esta versión optimizada de motor virtual se ha integrado en un modelo de vehículo tipo SUV estándar con el objetivo de cuantificar las prestaciones y los niveles de emisiones contaminantes generados en condiciones realistas.

Los resultados confirman que el control de aire es una estrategia prometedora para maximizar las prestaciones, disminuyendo las emisiones contaminantes de forma notable. Se ha podido observar en los resultados obtenidos que el aumento del consumo de combustible al minimizar las emisiones no es relevante consiguiendo una reducción de emisiones contaminantes muy significativa (6 veces menor).

Estos resultados se alinean con la fuerte presión de la Unión Europea por cumplir con la normativa de emisiones actual y lograr el objetivo de haber reducido en el año 2050 la producción de gases de efecto invernadero por parte de los vehículos de transporte en un 90%. Este objetivo sería asumible mediante la utilización del hidrógeno como combustible siempre y cuando los métodos de obtención del hidrógeno empleados fueran a partir de energías renovables.

En lo relativo a la evaluación de las consecuencias asociadas a integrar el motor virtual optimizado en un modelo de vehículo estándar, se ha confirmado que los ciclos WLTP nos proporcionan información cualitativa pero no cuantitativa. Comparando con los ciclos reales diseñados y evaluados, es una aproximación parecida a un ciclo de carretera puro. En otras palabras, son útiles para comparar los distintos escenarios y decidir cuál será la mejor estrategia a seguir, pero no proporcionan una estimación razonable en condiciones de conducción reales.

Los ciclos reales por su parte nos dan resultados muy distintos en función de la ruta seleccionada, por lo que nos facilitan una visión más realista de las prestaciones y emisiones del vehículo de acuerdo con su uso. De esta manera permiten una mejor predicción del impacto de la tecnología a gran escala, ya que se tendrán datos de consumo y emisiones más ajustados a la utilidad prevista para el vehículo. A partir de datos estadísticos sobre los usos del ICEV (urbano/mixto/carretera) los consumos globales de las flotas se pueden estimar de forma más precisa llevando a predicciones de ciclo de vida o análisis de costes mucho más precisos.

Queda de esta manera concluido el estudio de la posible adaptación de los motores actuales de encendido provocado a combustible de hidrógeno y su impacto a nivel vehículo, dejando abierta la puerta a futuras investigaciones en las que pueda extender este estudio a aplicaciones de otro tipo de transporte (no ligero), como vehículos de transporte de carga media o pesada.

## ANEXO I. Resultados optimización CA50.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para el proceso de optimización del ángulo de avance de la combustión (CA50). En las *Tablas 11-26* se puede observar que en algunos casos no es posible, por mucho que se avance la combustión, alcanzar el par necesario.

1250x42	Lambda	CA50
caso 1	1.8	-12.5
caso 2	2	-15
caso 3	2.2	-18.5
caso 4	2.4	-23
caso 5	2.6	-22.5
caso 6	2.8	-23.5
caso 7	3	-24
caso 8	3.2	-25

Tabla 11: CA50 óptimos para 1250x42

1250x120	Lambda	CA50
caso 1	1.8	-5.625
caso 2	2	-6.875
caso 3	2.2	-7.5
caso 4	2.4	-16.25
caso 5	2.6	No llega al target
caso 6	2.8	No llega al target
caso 7	3	No llega al target
caso 8	3.2	No llega al target

Tabla 12: CA50 óptimos para 1250x120

1500x22	Lambda	CA50
caso 1	1.8	-12.5
caso 2	2	-15
caso 3	2.2	-20.5
caso 4	2.4	-27.25
caso 5	2.6	-27
caso 6	2.8	-25
caso 7	3	-26.5
caso 8	3.2	-27

Tabla 13: CA50 óptimos para 1500x22

1500x62	Lambda	CA50
caso 1	1.8	-5.6
caso 2	2	-8.5
caso 3	2.2	-11.3
caso 4	2.4	-15
caso 5	2.6	-18
caso 6	2.8	-20
caso 7	3	-22
caso 8	3.2	-23

Tabla 14: CA50 óptimos para 1500x62

1500x124	Lambda	CA50
caso 1	1.8	-5
caso 2	2	-8
caso 3	2.2	-11.25
caso 4	2.4	-15
caso 5	2.6	-18
caso 6	2.8	-19
caso 7	3	-21.5
caso 8	3.2	-22

Tabla 15: CA50 óptimos para 1500x124

1500x220	Lambda	CA50
caso 1	1.8	-7.18
caso 2	2	-10
caso 3	2.2	-14
caso 4	2.4	-17.5
caso 5	2.6	-19
caso 6	2.8	-19.5
caso 7	3	-20
caso 8	3.2	-20.5

Tabla 16: CA50 óptimos para 1500x220

2000x22	Lambda	CA50
caso 1	1.8	-7.6
caso 2	2	-15
caso 3	2.2	-22
caso 4	2.4	-32
caso 5	2.6	-32
caso 6	2.8	-33
caso 7	3	-33
caso 8	3.2	-33

Tabla 17: CA50 óptimos para 2000x22

2000x62	Lambda	CA50
caso 1	1.8	-7.89
caso 2	2	-10
caso 3	2.2	-7.33
caso 4	2.4	-17
caso 5	2.6	-7.829
caso 6	2.8	-9.25
caso 7	3	-26.5
caso 8	3.2	-27

Tabla 18: CA50 óptimos para 2000x62

2000x103	Lambda	CA50
caso 1	1.8	-6
caso 2	2	-7.3
caso 3	2.2	-8.7
caso 4	2.4	-7.9
caso 5	2.6	-20
caso 6	2.8	-21.5
caso 7	3	-22
caso 8	3.2	-22

Tabla 20: CA50 óptimos para 2000x103

2000x157	Lambda	CA50
caso 1	1.8	-9.29
caso 2	2	-11.56
caso 3	2.2	-15.63
caso 4	2.4	-19
caso 5	2.6	-23.75
caso 6	2.8	No llega al target
caso 7	3	No llega al target
caso 8	3.2	No llega al target

Tabla 19: CA50 óptimos para 2000x157

2000x254	Lambda	CA50
caso 1	1.8	-8.5
caso 2	2	-7.76
caso 3	2.2	-7.56
caso 4	2.4	-17
caso 5	2.6	-17.75
caso 6	2.8	-18.75
caso 7	3	-19.5
caso 8	3.2	-7.63

Tabla 21: CA50 óptimos para 2000x254

2500x31	Lambda	CA50
caso 1	1.8	-12.5
caso 2	2	-16.01
caso 3	2.2	-21.25
caso 4	2.4	-25
caso 5	2.6	-31
caso 6	2.8	No llega al target
caso 7	3	No llega al target
caso 8	3.2	No llega al target

Tabla 22: CA50 óptimos para 2500x31

2500x62	Lambda	CA50
caso 1	1.8	-8.75
caso 2	2	-11.48
caso 3	2.2	-15.31
caso 4	2.4	-19.5
caso 5	2.6	-27
caso 6	2.8	No llega al target
caso 7	3	No llega al target
caso 8	3.2	No llega al target

Tabla 23: CA50 óptimos para 2500x62

2500x145	Lambda	CA50
caso 1	1.8	-7.5
caso 2	2	-10.25
caso 3	2.2	-15
caso 4	2.4	-17.75
caso 5	2.6	-22.75
caso 6	2.8	-23
caso 7	3	-7.55
caso 8	3.2	-9.53

Tabla 24: CA50 óptimos para 2500x145

3000x124	Lambda	CA50
caso 1	1.8	-12.73
caso 2	2	-16.25
caso 3	2.2	-19.53
caso 4	2.4	-25
caso 5	2.6	-32
caso 6	2.8	-33
caso 7	3	-33
caso 8	3.2	-33

Tabla 25: CA50 óptimos para 3000x124

3000x223	Lambda	CA50
caso 1	1.8	-14.38
caso 2	2	-17.81
caso 3	2.2	-23.13
caso 4	2.4	-28.5
caso 5	2.6	-29.3
caso 6	2.8	-29.38
caso 7	3	-30
caso 8	3.2	-30

Tabla 26: CA50 óptimos para 3000x223

Tras echar un vistazo a los resultados, se puede distinguir una tendencia creciente en el avance del inicio de la combustión a medida que aumenta el  $\lambda$ , además el CA50 también es mayor conforme se incrementan las revoluciones y el par solicitados. Esto ocurre porque, como se explicó en el Apartado 4.1, el ángulo de avance de la combustión depende

principalmente de la composición de la mezcla y la velocidad de los pistones. Los casos en los que no era suficiente el CA50 para alcanzar el par requerido (“no llega al target”) se descartaron.

## ANEXO II. Cálculo del volumen de hidrógeno a partir de la masa consumida.

Para obtener datos de alcance y consumo medio a los 100km del vehículo estudiado se realizaron los siguientes cálculos:

En primer lugar, los datos obtenidos de consumo total de combustible para cada ruta se introdujeron en una hoja de cálculo de Excel, mostrada en las Figuras 23 y 24, previamente diseñada para obtener la conversión de masa consumida a volumen ocupado del hidrógeno teniendo en cuenta el factor de compresibilidad de este como gas real.

Compressibility H2									
H2									
a	b	c	T[K]	Z (p=0,1 MPa)	Z (p=0,5 MPa)	Z (p=1 MPa)	Z (p=2 MPa)	Calculator	
0.058846	1.325	1	100	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	T [K]	266.7
-0.0613611	1.87	1	200	1.0007E+00	1.0034E+00	1.0067E+00	1.0136E+00	p [MPa]	0.5
-0.0026505	2.5	2	300	1.0006E+00	1.0029E+00	1.0059E+00	1.0117E+00	Z [-]	1.0031E+00
0.00273113	2.8	2	400	1.0005E+00	1.0024E+00	1.0048E+00	1.0095E+00		
0.00180237	2.938	2.42	500	1.0004E+00	1.0020E+00	1.0039E+00	1.0079E+00		
-0.0011507	3.14	2.63	600	1.0003E+00	1.0017E+00	1.0033E+00	1.0066E+00		
9.59E-05	3.37	3	800	1.0002E+00	1.0012E+00	1.0025E+00	1.0050E+00		
-1.11E-07	3.75	4	1000	1.0002E+00	1.0010E+00	1.0020E+00	1.0039E+00		
1.26E-10	4	5	p[MPa]	0.1	0.5	1	2		

$$Z(p,T) = \frac{p}{\rho RT} = 1 + \sum_{i=1}^9 a_i \left( \frac{100 \text{ K}}{T} \right)^{b_i} \left( \frac{p}{1 \text{ MPa}} \right)^{c_i}$$

Figura 23: Factor de compresibilidad del H2

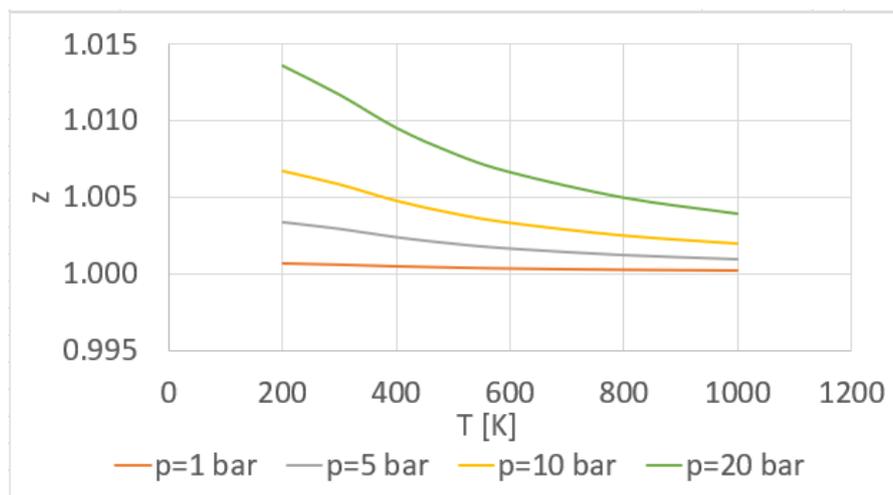


Figura 24: Representación gráfica del factor de compresibilidad del H2

En este caso el cálculo se realiza a nivel del mar ya que este modelo está diseñado para vehículos de automoción. En la *Figura 25*, se muestran los datos requeridos para realizar la conversión y el resultado en el caso de la ruta Aeropuerto de Valencia-Universidad de Madrid.

Volume estimation at sea level				
T [K]	298.150			
p [MPa]	70.000			
Z [-]	1.465			
R [kJ/kgK]	4.124			
rho [kg/m3]	38.847			
Mass [kg]	4.550 (from the simulation)			
Volume [m3]	0.117			
Volume [L]	117.1			

*Figura 25: Cálculo de la conversión de masa a volumen de H2*

A partir de este dato, la distancia recorrida en la ruta, la masa de combustible consumida durante el ciclo de conducción y el estado de la tecnología actual, los cálculos para obtener el alcance del modelo diseñado se reducen a relaciones simples.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Emisiones de CO2 de los coches: hechos y cifras (infografía)*. (14-06-2022). Parlamento europeo.  
<https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20190313STO31218/emisiones-de-co2-de-los-coches-hechos-y-cifras-infografia>
- [2] *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI)*. (mayo de 2024). Ministerio para la ecología y el reto demográfico. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei/inventario-gases-efecto-invernadero.html>
- [3] *GLOBAL CLIMATE HIGHLIGHTS 2022. 2022 saw record temperatures in Europe and across the world*. (9-01-2023). ECMWF as part of The Copernicus Programme.  
<https://climate.copernicus.eu/2022-saw-record-temperatures-europe-and-across-world>
- [4] *Deal confirms zero-emissions target for new cars and vans in 2035*. (27-10-2022). European Parliament. <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20221024IPR45734/deal-confirms-zero-emissions-target-for-new-cars-and-vans-in-2035>
- [5] *Ciclo WLTP de emisiones: ¿qué es y cuál es la normativa?* (06/09/2023). RACE.  
<https://www.race.es/ciclo-wltp-emisiones-coche>
- [6] Cebriá González, Á. (2022). *Estudio experimental en motor monocilíndrico del uso de hidrógeno como combustible libre de carbono* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- [7] Torre González, C. I. (2022). *Estudio de las características del hidrógeno como combustible y de las implicaciones sobre el diseño y funcionamiento de un MCIA* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- [8] Climent, H., Dolz, V., Pla, B., & González-Domínguez, D. (2022). Analysis on the potential of EGR strategy to reduce fuel consumption in hybrid powertrains based on advanced gasoline engines under simulated driving cycle conditions. *Energy Conversion and Management*, 266, 115830.
- [9] Algarra García, L. (2023). *Modelado y análisis de las prestaciones de un motor de encendido provocado adaptado para el uso de hidrógeno como combustible* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- [10] Benajes Calvo, J.V. (2021). Tema12 Combustión en motores de encendido provocado. En Novella Rosa, R, *GRA-11909\_2023-Motores Alternativos*. Universitat Politècnica de València.

## DOCUMENTO II

### PRESUPUESTO

## Presupuesto

En este segundo documento del trabajo se realizará el análisis de los costes de materiales necesarios para el proyecto. Se consideran los estudios numéricos y de procesamiento, además de los costes de diseño de los estudios experimentales. También se incluirá el coste de la mano de obra precisada para esta investigación, con el fin de determinar el coste total del proyecto.

El análisis del proyecto se lleva a cabo en el I.U.I CMT - Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia. Este presupuesto no incluye los componentes de construcción de los edificios del instituto ni los servicios de electricidad.

La unidad monetaria utilizada en este documento presupuestario es el Euro. Los precios unitarios se han obtenido nuevamente a partir de los manuales de procedimiento disponibles en el I.U.I CMT - Motores Térmicos para contrataciones.

El mencionado departamento tiene en cuenta distintos grupos de costes:

- **Mano de obra directa:** Se incluyen los gastos del personal involucrado en la realización del trabajo. Se cuantifica el tiempo invertido en el proyecto mediante la fracción €/h. Además, la mano de obra se clasifica en tres categorías de personal, cada una con su coste asociado.
  - **Ingeniero aeroespacial:** responsable principal de realizar las simulaciones, analizar y procesar los datos obtenidos.
- **Impuesto sobre el Valor Añadido (IVA):** Es importante señalar que los precios aplicados no tienen en cuenta el IVA. No obstante, en el precio final calculado sí se incluirá el IVA.

### Coste de mano de obra directa

Para llevar a cabo la contabilidad del presupuesto en relación con el personal, se incluye al ingeniero aeroespacial, considerando su condición de trabajo y las horas específicas dedicadas.

- Ingeniero aeroespacial
  - Salario bruto anual: 40867 €/año.
  - Horas anuales trabajadas.

$$\frac{\text{semanas totales}}{\text{año}} - \frac{\text{semanas festivas}}{\text{año}} - \frac{\text{semanas vacacionales}}{\text{año}} =$$

$$52 - 2 - 4 = 46 \text{ semanas/año}$$

$$\text{semana laboral} = 38 \text{ horas}$$

$$46 \frac{\text{semanas}}{\text{año}} \cdot 38 \frac{\text{horas}}{\text{semana}} = 1748 \frac{\text{horas}}{\text{año}}$$

- Coste Seguridad Social a cargo del empleador (23.6% del salario bruto anual).
$$SS = 0.236 \cdot 40867 = 9644.61 \text{ €/año}$$
- Coste anual del trabajador.

$$\text{Coste total} = \text{Salario bruto anual} + SS = 40867 + 9644.61 = 50511.61 \text{ €/año}$$

- Coste por horas del trabajador.

$$\text{Coste por horas} = \frac{\text{Coste total}}{\text{Horas anuales trabajadas}} = \frac{50511.61}{1748} = 28.90 \text{ €/hora}$$

Los resultados del coste total de la mano de obra directa se recogen en la siguiente tabla:

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO (€/ud.)	COSTE PARCIAL (€)
Ingeniero aeroespacial	Horas	360	28.90	10404
<b>COSTE TOTAL DE LA MANO DE OBRA EMPLEADA</b>				10404

### Coste de licencias software

En la siguiente tabla se detallan las horas de uso de licencias de software y del clúster de alto rendimiento necesarias. También se indican el precio por hora de uso y, finalmente, el coste total de los equipos y las licencias de software.

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO (€/ud.)	COSTE PARCIAL (€)
Licencia software	Horas	450	26.35	11857.5
Clúster de alto rendimiento	Horas	400	18.30	7320
<b>COSTE TOTAL DE EQUIPOS Y LICENCIAS SOFTWARE</b>				19177.5

### Presupuesto total

DESCRIPCIÓN	COSTE PARCIAL (€)
Mano de obra directa	10404
Equipos y licencias de software	19177.5
<b>PRESUPUESTO TOTAL</b>	29581.5

El presupuesto total asciende a **veintinueve mil quinientos ochenta y uno con cincuenta euros**.

## DOCUMENTO III

# OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA AGENDA 2030

## Descripción de la alineación del TFG/M con los ODS.

Objetivos de Desarrollo Sostenible	Alto	Medio	Bajo	No Procede
<b>ODS 1. Fin de la pobreza.</b>				X
<b>ODS 2. Hambre cero.</b>				X
<b>ODS 3. Salud y bienestar.</b>		X		
<b>ODS 4. Educación de calidad.</b>				X
<b>ODS 5. Igualdad de género.</b>				X
<b>ODS 6. Agua limpia y saneamiento.</b>			X	
<b>ODS 7. Energía asequible y no contaminante.</b>	X			
<b>ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico.</b>		X		
<b>ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.</b>	X			
<b>ODS 10. Reducción de las desigualdades.</b>			X	
<b>ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles.</b>	X			
<b>ODS 12. Producción y consumo responsables.</b>	X			
<b>ODS 13. Acción por el clima.</b>	X			
<b>ODS 14. Vida submarina.</b>			X	
<b>ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres.</b>	X			
<b>ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas.</b>				X
<b>ODS 17. Alianzas para lograr objetivos.</b>			X	

Este Trabajo de Fin de Grado está principalmente motivado por la necesidad de encontrar alternativas a los combustibles fósiles utilizados en automoción. Es bien sabido que la combustión en los actuales MCIAs lleva asociado un problema de contaminación y en los últimos años estudios han revelado que el sector del transporte es el responsable de una cuarta parte de las emisiones de CO<sub>2</sub> en la UE, de las cuales el 71,1% provenía del transporte por carretera. Los datos planteados representan un problema al que se ha intentado dar solución en este proyecto.

Las principales emisiones contaminantes generadas en la combustión de combustibles fósiles son: Monóxido de Carbono (CO), Hidrocarburos sin quemar (HC), Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>), partículas líquidas y sólidas, Compuestos de Plomo (Pb) y Óxidos de Azufre (SO<sub>x</sub>). Entre estas emisiones se encuentran los gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O), que son autores del cambio climático.

En esta lucha contra la contaminación y el cambio climático, se propone una alternativa libre de emisiones de carbono, hidrocarburos sin quemar ni partículas líquidas y sólidas y

que reduce al mínimo las emisiones de NOx. Al reducir las emisiones contaminantes, se favorecería la mejora en la calidad de vida de las ciudades, reduciendo la aparición de enfermedades respiratorias y la contaminación de estas. El combustible del que se habla y sobre el que gira el estudio realizado es el Hidrógeno, pues sus numerosas ventajas lo hacen una opción muy atractiva de cambio hacia el transporte sostenible.

Al margen de la reducción de las emisiones contaminantes, el hidrógeno como combustible presenta más virtudes. Una de ellas es su abundancia y sostenibilidad, puesto que es el elemento más abundante en el universo y existen diversas fuentes de obtención, incluyendo el agua (a través de electrólisis) y gas natural (por medio de procesos de reformado). Si se utilizan energías renovables para llevar a cabo estos procesos, se puede garantizar un suministro sostenible y limpio de hidrógeno.

La posibilidad de adaptar motores de encendido provocado a combustión de hidrógeno sería un gran avance tecnológico ya que, mediante algunos sencillos cambios se podría dar una solución asequible para aquellos que desean iniciar el cambio hacia la movilidad verde pero no disponen de recursos para comprar un vehículo nuevo. Sumado a esto, una vez se consiguiera esta adaptación, se podría extender el uso de este combustible a otros ámbitos, como al sector marítimo o aéreo reduciendo así también la contaminación en mares y sus consecuencias sobre la salud de las personas y el entorno.

Por último, cabe destacar el potencial económico del proyecto, ya que la transición hacia un hidrógeno verde abre la posibilidad de nuevas oportunidades económicas y empleos en sectores como la producción de energías renovables, la manufactura de equipos y la infraestructura de distribución de hidrógeno. Además, el cambio puede también reducir la dependencia de los combustibles fósiles importados, mejorando la seguridad energética y eliminando el monopolio existente por parte de algunos países, favoreciendo la reducción de la desigualdad.

Las evidencias presentadas en este análisis demuestran que el proyecto se ajusta a las metas que marcan los Objetivos de Desarrollo Sostenibles de la Agenda 2030, puesto que presenta una propuesta de mejora a nivel medioambiental, tecnológica, social y económica.