



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Estudio experimental en motor monocilíndrico del uso de  
hidrógeno como combustible libre de carbono

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

AUTOR/A: Cebriá González, Álvaro

Tutor/a: Molina Alcaide, Santiago Alberto

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

TRABAJO FIN DE GRADO

# Estudio experimental en motor monocilíndrico del uso de hidrógeno como combustible libre de carbono

Realizado por

**Álvaro Cebriá González**

Para la obtención del título de  
Grado en Ingeniería Aeroespacial

Dirigido por

Santiago Alberto Molina Alcaide  
Miguel Olcina Girona

Realizado en el departamento de  
Motores Térmicos - CMT

**Curso académico 2021/22**



---

# Agradecimientos

---

En primer lugar, quiero agradecer a Ekram Benkaddour El Guassmi por acompañarme durante todos estos meses y aportarme tanta felicidad. Con tu apoyo, cariño y amor conseguiste convertirme en la persona más afortunada del mundo.

Por supuesto, también siento una enorme gratitud hacia mis padres y mis hermanos por estar ahí y apoyarme siempre en el camino.

También quiero agradecer a mis tutores Miguel y Santiago por el apoyo, ayuda y atención que he recibido durante el desarrollo de este trabajo.

---

# Resumen

---

En las últimas décadas el calentamiento global ha cobrado una importancia incuestionable, hasta el punto de que la mayoría de los gobiernos han impuesto políticas medioambientales a las empresas e industrias para tratar de ralentizar su crecimiento. Esta situación obliga a desarrollar tecnologías sostenibles con emisiones reducidas. En el sector automovilístico, esto significa diseñar motores que generen la más mínima cantidad de  $CO_2$  durante su operación. Existen tres rutas principales: mejorando la eficiencia del motor, modificando el tipo de motor (de combustión a eléctrico) o modificando el tipo de combustible. En este trabajo de fin de grado se abordará la tercera alternativa y se propondrá el hidrógeno como combustible alternativo, ya que debido a que no contiene carbón, su producción de  $CO_2$  durante la operación del motor es nula. En los meses venideros, se van a realizar ensayos en un motor de combustión interna alternativo operando con hidrógeno con el objetivo analizar tanto las prestaciones como las emisiones cuando se modifican ciertos parámetros del motor. Los resultados obtenidos serán uno de los dos pilares fundamentales de este trabajo. El otro pilar vendrá dado por un detallado análisis de lo que supone la transición al hidrógeno en términos de las emisiones generadas y los costes asociados a la producción y distribución del combustible. Adicionalmente, también se introducirán los motores de combustión interna alternativos y se analizarán las ventajas, desventajas y retos que supone el uso de hidrógeno en este tipo de motores.

**Palabras clave:** Hidrógeno, inyección directa, avance de la inyección, relación aire-combustible, energías renovables, combustibles fósiles, emisiones

---

# Abstract

---

Over the last decades, global warming has gathered an importance of unquestionable magnitude to the point where most governments have imposed environmental policies on businesses and industries to undermine its rate of growth. This situation requires the development of sustainable technologies with reduced emissions. In the motoring sector, this means designing engines that produce the least amount of  $CO_2$  possible during their operation. There exist three possible routes: enhancing the engine's efficiency, modifying the engine type (from combustion to electric), or modifying the type of fuel. In this final course project, the third option will be addressed and hydrogen will be proposed as the alternative fuel, as it does not contain carbon, and its  $CO_2$  production during the engine operation is null. In the upcoming months, there are going to be tests carried out in a reciprocating internal combustion engine running with hydrogen to analyze both the performance and the emissions when certain engine parameters are modified. The results obtained will be one of the two main blocks of this work. The other main block will be composed by a detailed analysis of what the transition to hydrogen involves in terms of the emissions generated and the costs associated with the production and distribution of the fuel itself. Additionally, reciprocating internal combustion engines will be introduced and the advantages, disadvantages and challenges associated with the use of hydrogen in this engines will be analysed.

**Keywords:** Hydrogen, direct injection, start of injection, air-fuel ratio, renewable energy, fossil fuels, emissions

---

# Índice general

---

Resumen	II
Abstract	III
Lista de figuras	VIII
Lista de tablas	IX
Nomenclatura	x
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto y motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	4
1.3. Estructura . . . . .	4
<b>2. Motores de combustión interna alternativos</b>	<b>6</b>
2.1. Introducción . . . . .	6
2.2. Contexto histórico . . . . .	6
2.3. Parámetros básicos del motor . . . . .	7
2.3.1. Parámetros geométricos . . . . .	7
2.3.2. Parámetros de funcionamiento . . . . .	8
2.3.3. Parámetros indicados y efectivos . . . . .	10
2.4. MEP y MEC . . . . .	13
2.4.1. Funcionamiento de un MEP . . . . .	13
2.4.2. Combustión en MEP . . . . .	16
2.4.3. Funcionamiento de un MEC . . . . .	19
2.4.4. Diferencias fundamentales entre MEP y MEC . . . . .	19
2.5. Inyección indirecta e inyección directa . . . . .	21
<b>3. Operación con hidrógeno</b>	<b>22</b>
3.1. Introducción . . . . .	22
3.2. Propiedades físico-químicas del hidrógeno . . . . .	22
3.3. Integración en el vehículo . . . . .	23
3.4. Prestaciones . . . . .	23
3.4.1. Potencia . . . . .	23
3.4.2. Rendimiento térmico . . . . .	24
3.5. Emisiones . . . . .	26
3.6. Regulación de la carga . . . . .	28
3.7. Combustión anormal . . . . .	29
<b>4. Transición al hidrógeno</b>	<b>31</b>
4.1. Introducción . . . . .	31
4.2. Producción y obtención de hidrógeno . . . . .	31

4.2.1.	Contexto y motivación . . . . .	31
4.2.2.	Producción a partir de combustibles fósiles . . . . .	33
4.2.3.	Producción a partir de agua . . . . .	34
4.2.4.	Producción a partir de biomasa . . . . .	34
4.2.5.	Métodos de distribución . . . . .	35
4.3.	Mix energéticos . . . . .	36
4.4.	Análisis de las emisiones del ciclo del hidrógeno . . . . .	39
4.4.1.	Emisiones de la producción de hidrógeno . . . . .	39
4.4.2.	Emisiones de la distribución de hidrógeno . . . . .	45
4.4.3.	Emisiones de la operación del vehículo . . . . .	46
4.5.	Análisis económico . . . . .	52
4.5.1.	Factores que afectan al coste . . . . .	52
4.5.2.	Coste de la producción de hidrógeno . . . . .	53
4.5.3.	Coste de la distribución de hidrógeno . . . . .	54
4.5.4.	Coste de la operación del vehículo . . . . .	57
4.6.	Conclusiones . . . . .	58
4.6.1.	Emisiones asociadas al ciclo de combustible del $H_2$ . . . . .	58
4.6.2.	Costes asociados al ciclo de combustible del $H_2$ . . . . .	59
4.6.3.	Conclusiones globales de ambos estudios . . . . .	60
4.6.4.	Conclusiones de los resultados obtenidos de la operación del vehículo cada 100 km . . . . .	60
4.6.5.	Limitaciones . . . . .	64
<b>5.</b>	<b>Procedimiento experimental</b>	<b>65</b>
5.1.	Introducción . . . . .	65
5.2.	Sala de ensayos . . . . .	65
5.3.	Puntos experimentales . . . . .	70
5.4.	Plan de ensayos . . . . .	70
5.4.1.	Resumen . . . . .	70
<b>6.</b>	<b>Resultados experimentales</b>	<b>72</b>
6.1.	Introducción . . . . .	72
6.2.	Ciclo abierto VS Ciclo cerrado . . . . .	72
6.3.	Encendido y presiones en cilindro . . . . .	77
6.4.	Prestaciones . . . . .	82
6.5.	Emisiones . . . . .	88
6.6.	Conclusiones . . . . .	91
<b>7.</b>	<b>Conclusiones generales</b>	<b>93</b>
<b>8.</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>97</b>
<b>9.</b>	<b>Pliego de condiciones</b>	<b>101</b>
9.1.	Condiciones generales . . . . .	101
9.2.	Marco legal . . . . .	101
9.2.1.	Real Decreto 488/1997 de 14 de abril . . . . .	102
9.2.2.	Real Decreto-ley 28/2020 . . . . .	102

<b>10.Presupuesto</b>	<b>104</b>
10.1. Introducción . . . . .	104
10.2. Costes de investigación . . . . .	105
10.2.1. Coste de mano de obra . . . . .	105
10.2.2. Coste de amortización de equipos y sistemas auxiliares . . . . .	105
10.2.3. Coste de material fungible . . . . .	106
10.2.4. Presupuesto total . . . . .	106

---

# Índice de figuras

---

1.1.	Emisiones de gases de efecto invernadero por sector (2016) [49] . . . . .	2
1.2.	Emisiones de $NO_x$ por sector (2011) [4] . . . . .	3
2.1.	Esquema de los MCIA [25] . . . . .	7
2.2.	Diagrama del indicador [11] . . . . .	10
2.3.	Fases del motor en MEP [35] . . . . .	14
2.4.	Diagrama de distribución [17] . . . . .	15
2.5.	Avance del frente de llama en MEP [25] . . . . .	17
2.6.	Fases de la combustión [25] . . . . .	17
3.1.	Potencia específica de $H_2$ para diferentes conceptos de formación de mezcla [46]. . . . .	24
3.2.	Velocidad de combustión laminar de $H_2$ comparado con gasolina y metano [10, 28]. . . . .	26
3.3.	Emisiones de $NO_x$ para mezclas homogéneas de $H_2$ y aire en función de $\lambda$ [46]. . . . .	27
4.1.	Fuentes de producción de hidrógeno [36]. . . . .	32
4.2.	Demanda de energía mundial [30] . . . . .	36
4.3.	Mix energético en Europa en 2017 [14] y 2050 [24]. . . . .	37
4.4.	Fuente de generación de electricidad en los Estados Unidos desde 2010 hasta 2050 [3]. . . . .	37
4.5.	GWP de distintas tecnologías de electrólisis [9]. . . . .	40
4.6.	Emisiones de $CO_2$ equivalente para distintos métodos de producción de $H_2$ [31]. . . . .	41
4.7.	Emisiones de $CO_2$ equivalente para distintos métodos de producción de $H_2$ [13]. . . . .	42
4.8.	GWP de distintas tecnologías de producción de $H_2$ [9]. . . . .	43
4.9.	Emisiones GHG para $H_2$ gaseoso o líquido, distintas rutas de producción y distribución y año de estudio [16]. . . . .	44
4.10.	Consumos de hidrógeno o gasolina para los vehículos de la Tabla 4.1 . . . . .	47
4.11.	Consumos de energía de los vehículos de la Tabla 4.1 operando con hidrógeno o gasolina. . . . .	48
4.12.	Emisiones de $CO_2$ considerando <i>fuel cycle</i> (producción, distribución y consumo del combustible) para los vehículos de la Tabla 4.1. . . . .	50
4.13.	Previsión de coste de producción y de recursos materiales [34]. . . . .	55
4.14.	Coste del transporte de $H_2$ (GH2 y LH2 figuras superior e inferior respectivamente) para una demanda de 10 toneladas al día en China [34]. . . . .	56
4.15.	Coste previsto para 2030 de operación cada 100 <i>km</i> de los vehículos de la Tabla 4.1 operando con hidrógeno y gasolina. . . . .	57
5.1.	Esquema de la sala de ensayos experimentales . . . . .	65

6.1. Secuencia de fases, volumen y presión en el cilindro genéricas en función del ángulo de giro del cigüeñal. . . . .	73
6.2. Avance del encendido y duración de la mezcla en 1500@4- $\lambda$ 2.6. . . . .	74
6.3. Presión de admisión en 1500@4- $\lambda$ 2.6 . . . . .	75
6.4. Temperatura de escape en 1500@4- $\lambda$ 2.6 . . . . .	75
6.5. Presión media indicada en 1500@4- $\lambda$ 2.6 . . . . .	76
6.6. $NO_x$ producidos en 1500@4- $\lambda$ 2.6 . . . . .	76
6.7. Avance al encendido <i>MBT</i> para cada valor del AI. . . . .	77
6.8. Duración de la mezcla en función del AI. . . . .	78
6.9. Evolución de la presión en cilindro (media de 250 ciclos) con el giro del cigüeñal para 1500@4. . . . .	79
6.10. Evolución de la presión en el cilindro (media de 250 ciclos) máxima para los distintos $\lambda$ . . . . .	80
6.11. Evolución de la presión en cilindro (media de 250 ciclos) con el giro del cigüeñal para 1500@7. . . . .	81
6.12. Resultados de la presión media indicada ( <i>PMI</i> ). . . . .	83
6.13. Resultados de la <i>PMI</i> máxima y avance a la inyección en el que se da. . . . .	84
6.14. Ganancia máxima de retrasar la inyección respecto al caso de AI más adelantado. . . . .	85
6.15. Rendimiento indicado (o rendimiento térmico) obtenido. . . . .	86
6.16. Rendimientos indicados máximos para cada $\lambda$ y ambos puntos experimentales. . . . .	87
6.17. Consumo específico indicado mínimo para cada $\lambda$ y punto de funcionamiento. . . . .	87
6.18. Evolución de los $NO_x$ generados con el avance de la inyección. . . . .	88
6.19. Comparación entre la <i>PMI</i> máxima y el AI con emisión de $NO_x$ inferior a 100 ppm y el equivalente sin limitación de $NO_x$ (Figura 6.13). . . . .	90

---

# Índice de cuadros

---

2.1. Diferencias entre MEP y MEC [11] . . . . .	21
3.1. Propiedades del hidrógeno y la gasolina [41, 46] . . . . .	22
4.1. Vehículos seleccionados para diferentes análisis de consumos, emisiones y costes. . . . .	46
4.2. Emisiones de $CO_2$ asociadas a la producción, distribución y consumo del combustible. . . . .	49
4.3. Consumos de energía y combustible en la operación de diferentes tipos de vehículos [19, 18]. . . . .	51
4.4. Ventajas y desventajas de la producción a partir de combustibles fósiles.	53
4.5. Ventajas y desventajas de la producción por electrólisis de agua. . . . .	53
4.6. Análisis del coste de purificación [34]. . . . .	54
5.1. Especificaciones del motor . . . . .	67
5.2. Puntos experimentales de los ensayos . . . . .	70
5.3. Barridos de $\lambda$ y AI para cada punto experimental . . . . .	71
6.1. Prestaciones óptimas obtenidas para cada punto experimental. . . . .	92
10.1. Coste de mano de obra . . . . .	105
10.2. Coste de amortización de equipos y sistemas auxiliares . . . . .	105
10.3. Coste de material fungible . . . . .	106
10.4. Presupuesto total de la investigación . . . . .	106

---

# Nomenclatura

---

La siguiente lista describe los símbolos y abreviaciones que aparecen a lo largo del documento.

## Abreviaciones

<i>AFR</i>	Relación aire / combustible
$AFR_{est}$	Relación aire / combustible estequiométrica
<i>EGR</i>	Recirculación de los gases de escape
<i>ISFC</i>	<i>Indicated specific fuel consumption</i>
<i>MBT</i>	<i>Maximum brake torque timing</i>
<i>PCI</i>	Poder calorífico inferior
<i>PCS</i>	Poder calorífico superior
AAA	Avance en la apertura de admisión
AAE	Avance en la apertura de escape
AE	Avance al encendido
AI	Avance a la inyección
ATR	<i>Autothermal reforming</i>
BEV	<i>Battery electric vehicles</i>
CCS	<i>Carbon capture and storage</i>
CG	<i>Steam methane reforming</i>
CNG	Gas natural comprimido
DFMQ	Derivada de la fracción de masa quemada
DFQL	Derivada de la fracción de calor liberado
ER	Energías renovables
FCV	<i>Fuel cell vehicles</i>
FMQ	Fracción de masa quemada
FQL	Fracción de calor liberado
GH2	Hidrógeno gaseoso comprimido
GHG	Gases de efecto invernadero
GWP	<i>Global warming potential (kgCO<sub>2,eq</sub>/kgfuel)</i>
HEV	<i>Hybrid electric vehicle</i>
HICE	<i>Hydrogen internal combustion engine</i>
IEA	<i>International energy agency</i>
LCA	<i>Life cycle assesment</i>
LH2	Hidrógeno líquido criogénico
MCIA	Motores de combustión interna alternativos
MEC	Motores de encendido por compresión
MEP	Motores de encendido provocado
NEDC	<i>New European Driving Cycle</i>
PFI	<i>Port fuel injection</i>
PMI	Punto muerto inferior
PMS	Punto muerto superior
POX	<i>Partial oxidation</i>
PV	Paneles solares fotovoltaicos

RCA	Retraso en el cierre de la admisión
RCE	Retraso al cierre del escape
SMR	<i>Steam methane reforming</i>
UHC	Hidrocarburos sin quemar
USD	<i>United States dollars</i>
VVT	Sistema de distribución variable de válvulas

### **Símbolos**

$\alpha$	Grado de carga
$\alpha_c$	Ángulo que gira el cigüeñal durante la combustión
$\dot{m}_a$	Gato másico de aire
$\dot{m}_f$	Gasto másico de combustible
$\eta_e$	Rendimiento efectivo
$\eta_i$	Rendimiento indicado
$\eta_v$	Rendimiento volumétrico
$\gamma$	Coefficiente adiabático de un gas
$\lambda$	Relación aire / combustible relativa
$\phi$	Dosado
$c_m$	Velocidad lineal media del pistón
$CH_3$	Metano
$CO$	Monóxido de carbono
$CO_2$	Dióxido de carbono
$D$	Diámetro del cilindro
$g_{ef}$	Consumo específico efectivo
$H_2$	Hidrógeno puro
$H_2O$	Vapor de agua
$i$	Ciclos por revolución
$L$	Longitud de la biela
$l$	Longitud de la manivela
$M_e$	Par efectivo
$n$	Régimen de giro
$N_2O$	Óxido nitroso
$N_e$	Potencia efectiva
$N_i$	Potencia indicada
$N_{esp}$	Potencia específica
$NO_x$	Óxidos de nitrógeno
$O_2$	Oxígeno
$O_3$	Ozono
$p$	Presión
$PME$	Presión media efectiva
$PMI$	Presión media indicada
$R$	Constante del gas ideal
$r_c$	Relación de compresión
$S$	Carrera del pistón
$T$	Temperatura
$u_c$	Velocidad de combustión
$u_{cl}$	Velocidad de combustión laminar
$V$	Volumen

$V_C$	Volumen de la cámara de combustión
$V_D$	Cilindrada unitaria
$V_T$	Cilindrada total
$W_b$	Trabajo de bombeo
$W_e$	Trabajo efectivo
$W_i$	Trabajo indicado

---

# 1. Introducción

---

## 1.1. Contexto y motivación

Calentamiento global, cambio climático, emisiones y sostenibilidad. Son palabras con las que hoy en día cualquiera está familiarizado ya que se han convertido en temas recurrentes tanto en los medios de comunicación como en las redes sociales. La insistencia de los medios en hacer noticias de dichos temas está más que justificada ya que los problemas asociados a ellos son sin duda reales y graves a medio y largo plazo. El cambio climático tiene consecuencias globales como la fundición de los casquetes polares, aumento del nivel del mar, destrucción de hábitat y mayor frecuencia de catástrofes naturales, entre otras. Por otra parte, las emisiones de contaminación local están relacionadas directamente con la salud del ser humano a través de la calidad del aire y del agua y también perjudican al medio ambiente. Ambos están promovidos por las acciones humanas que derivan en la emisión de gases por la combustión de hidrocarburos, es decir, el uso de combustibles fósiles como gasolina, diésel o gas natural.

Concretamente, el cambio climático está relacionado con la emisión de gases de efecto invernadero (GHG). Entre estos, se encuentran el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), vapor de agua ( $H_2O$ ), óxido de nitroso ( $N_2O$ ), metano ( $CH_4$ ) y ozono ( $O_3$ ). El  $CO_2$  es el principal impulsor del calentamiento global debido a la quema de combustibles. Actualmente, el planeta emite alrededor de 50 billones de toneladas de GHG cada año [4]. El origen por sector de los GHG (en el año 2016) se muestra en la Figura 1.1. En ella, se muestra que alrededor del 70 % proviene del sector energético, y dentro de este, el transporte ocupa un 16 %. Ya en el sector del transporte, el efectuado por carretera es el mayor responsable, ocupando un 11.9 % de las emisiones globales de  $CO_2$ . Es decir, si se consiguiera de-carbonizar por completo el transporte por carretera, se reduciría hasta en más de un 10 % las emisiones de GHG.

Respecto a las emisiones de contaminación local, estas se componen de monóxido de carbono ( $CO$ ), hidrocarburos sin quemar (UHC), óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) y partículas. Los  $NO_x$  son uno de los más importantes. En la Figura 1.2, se muestra la distribución de emisiones de  $NO_x$  por sector. Se observa que algo menos de la mitad proviene del transporte por carretera.

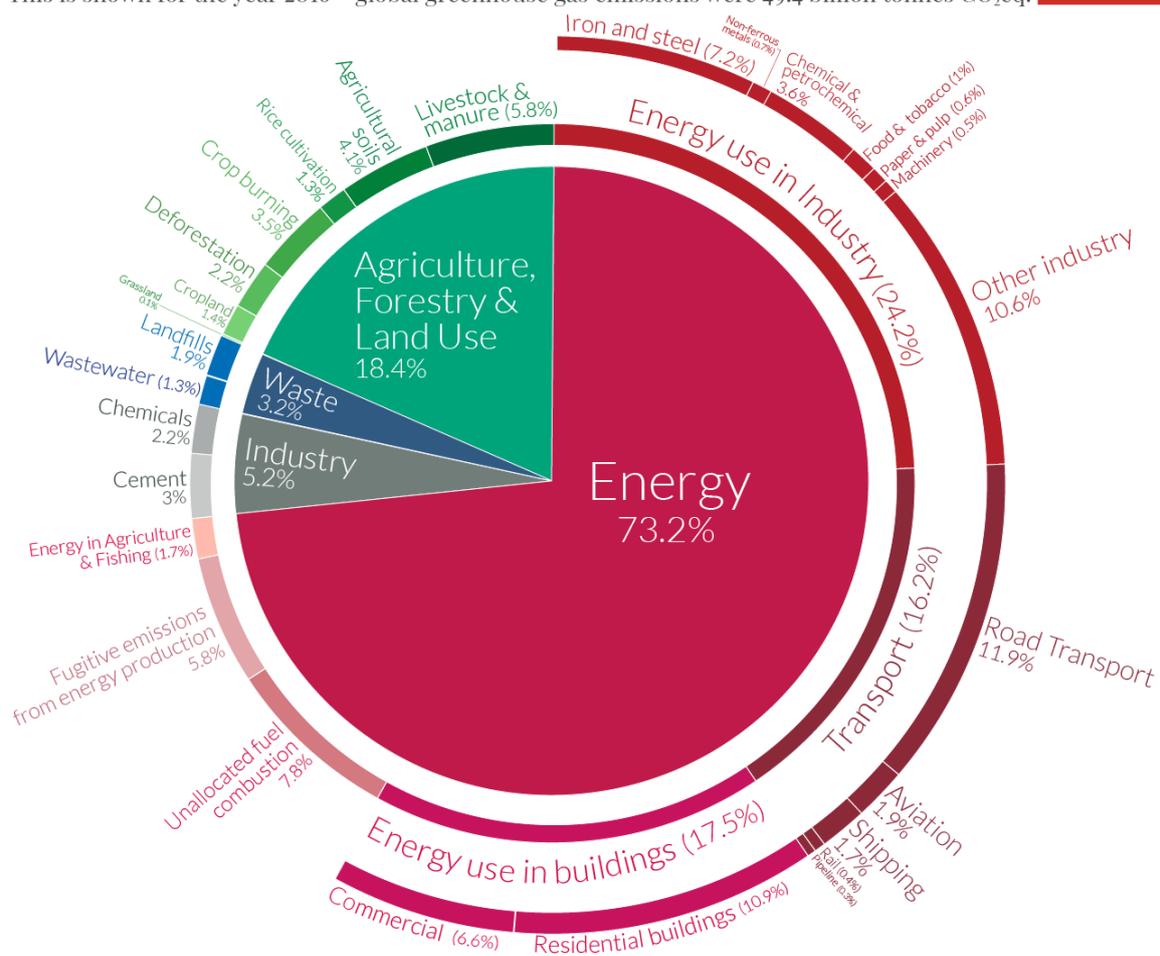
Así pues, el cambio climático y la contaminación local están notablemente influenciados por el transporte por carretera. Por lo tanto, el desarrollo de nuevas tecnologías en el sector de la automoción enfocadas a la reducción de emisiones es crucial si se desea ralentizar el cambio climático y reducir las emisiones locales. Este trabajo gira alrededor del primer asunto: la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, mas concretamente  $CO_2$ , en el sector de la automoción.

Debido a la mencionada urgencia de combatir el cambio climático y a la influencia del sector del transporte, desde hace décadas los gobiernos de multitud de países imponen a las empresas automovilísticas regulaciones y restricciones cada vez mas estrictas

# Global greenhouse gas emissions by sector



This is shown for the year 2016 – global greenhouse gas emissions were 49.4 billion tonnes CO<sub>2</sub>eq.



OurWorldinData.org – Research and data to make progress against the world's largest problems.

Source: Climate Watch, the World Resources Institute (2020).

Licensed under CC-BY by the author Hannah Ritchie (2020).

Figura 1.1: Emisiones de gases de efecto invernadero por sector (2016) [49]

Chart – Sector share of nitrogen oxides emissions

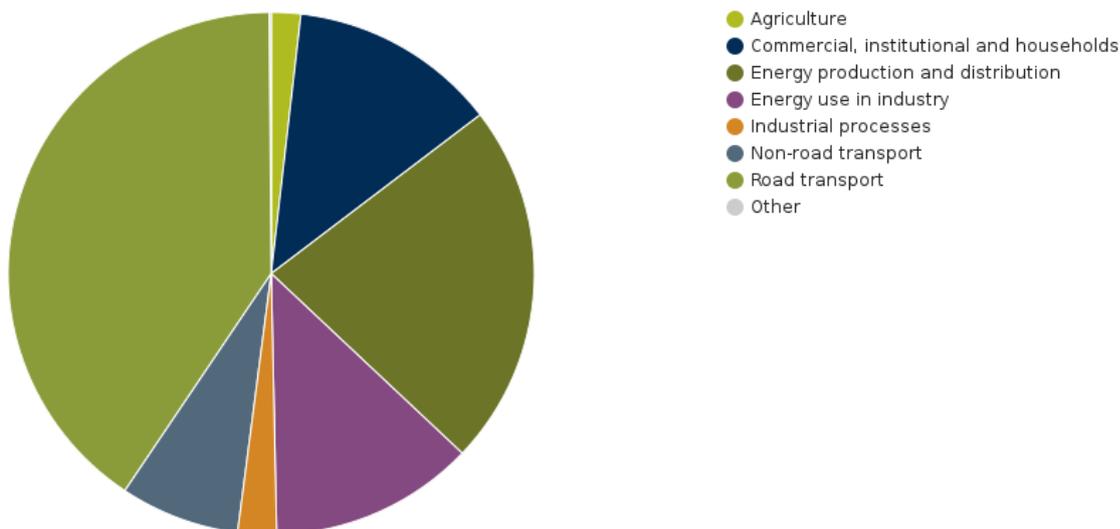


Figura 1.2: Emisiones de  $NO_x$  por sector (2011) [4]

relacionadas con la reducción de emisiones de  $CO_2$  (y también de los  $NO_x$ ). El  $CO_2$  en el sector de automoción se emite en el proceso de combustión de los motores de combustión interna alternativos (MCIA). Gasolina y diésel son los combustibles utilizados masivamente y, como son hidrocarburos, el proceso de combustión emite inevitablemente  $CO_2$ . Los  $NO_x$  también se generan debido a que el aire que aspira el motor contiene nitrógeno en un 79 %, el cual sometido a altas temperaturas se transforma en  $NO_x$ . La cantidad de  $CO_2$  emitida está relacionada con la composición química del combustible y con la cantidad de combustible quemado. Consecuentemente, las empresas automovilísticas centran sus esfuerzos en diseñar motores mas eficientes, que emitan menor cantidad de  $CO_2$ . Pese a los esfuerzos, el aumento de eficiencia de un motor está limitado tecnológicamente y termo-dinámicamente. Por ello, en los últimos años se ha hecho más hincapié en transformar el tipo de motor, de motor térmico a motor eléctrico y en modificar el combustible de operación del motor.

Bajo el marco medioambiental descrito, este trabajo de fin de grado aborda la segunda estrategia: modificar el combustible de operación. Concretamente, se opta por hidrógeno puro ( $H_2$ ) como combustible que debe ser capaz de sustituir a los famosos gasolina y diésel en el sector de la automoción. La transición al hidrógeno es especialmente llamativa porque ofrece diversas ventajas pero sin duda las más importantes son que, al no contener carbón en su composición química, su combustión no produce  $CO_2$  y por otra parte, es el elemento más abundante de la tierra así que su disponibilidad está asegurada.

En este escenario, en el Instituto Universitario CMT-Motores Térmicos, se están realizando ensayos en un MCIA de encendido provocado con hidrógeno como combustible para analizar las prestaciones y las emisiones.

## 1.2. Objetivos

Este trabajo pretende promover la transición al hidrógeno en el sector de la automoción. Se plantean los siguientes objetivos:

- Introducir los motores de combustión interna alternativos.
- Entender las propiedades que ofrece el hidrógeno como combustible y discutir su viabilidad como alternativa a los combustibles convencionales.
- Conocer cuales son los principales métodos de producción y distribución de hidrógeno y sus características.
- Analizar las emisiones asociadas a la producción y distribución de hidrógeno y obtener conclusiones sobre las mejores rutas.
- Analizar los costes asociados a la producción y distribución de hidrógeno y obtener conclusiones sobre las mejores rutas.
- Analizar las ventajas y desventajas de mezclas pobres de hidrógeno en términos de prestaciones en un MCIA de encendido provocado.
- Analizar las ventajas y desventajas de mezclas pobres de hidrógeno en términos de emisiones contaminantes en un MCIA de encendido provocado.

## 1.3. Estructura

Este apartado se ha escrito una vez se ha completado el trabajo, para así poder resumir con precisión las ideas abordadas en cada capítulo.

### **Capítulo 2: Motores de combustión interna alternativos**

Este primer capítulo después de la introducción proporciona un marco teórico sobre los MCIA que sirve como base para poder comprender los conceptos del Capítulo 3 y Capítulo 6. Se explica el principio de funcionamiento de estos motores, se presentan los parámetros fundamentales para entender su funcionamiento, se indaga en el proceso de combustión y se hace distinción entre los dos tipos de MCIA que se encuentran en el mercado.

### **Capítulo 3: Operación con hidrógeno**

En este capítulo se presentan las propiedades físico-químicas del hidrógeno y se analizan las ventajas o desventajas de la aplicación del hidrógeno en MCIA atendiendo a estas propiedades. Se analizan las implicaciones del uso de hidrógeno en términos de integración en el vehículo, las prestaciones, emisiones y regulación de la carga. Además, también se presentan las mismas propiedades de la gasolina, para así poder hacer una comparación interesante.

#### **Capítulo 4: Transición al hidrógeno**

Este capítulo, junto con el capítulo 6, son los pilares fundamentales de este trabajo de fin de grado. En el se presentan los métodos de producción y distribución del hidrógeno. Se realizan dos estudios bibliográficos, uno sobre las emisiones asociadas a la fase de producción y distribución del hidrógeno y otro sobre los costes asociados a los mismos procesos. Combinando información de estos estudios y datos de vehículos reales, se han creado diversos gráficos de operación del vehículo cada 100 *km*, en términos de consumos, emisiones y costes.

#### **Capítulo 5: Procedimiento experimental**

En este capítulo se describe el procedimiento experimental llevado a cabo para los ensayos experimentales realizados en el instituto CMT-Motores Térmicos. Se describe la sala de ensayos, con énfasis en el motor, los puntos experimentales medidos y el plan de ensayos.

#### **Capítulo 6: Resultados experimentales**

Se analizan los resultados experimentales obtenidos del estudio realizado en CMT-Motores térmicos sobre la utilización de  $H_2$  como combustible en un motor de encendido provocado e inyección directa. El análisis se realiza en términos del proceso de combustión, las prestaciones y las emisiones.

#### **Capítulo 7: Conclusiones generales**

Se recopilan las conclusiones generales de todo el trabajo, demostrando su validez y su importancia en el marco medioambiental establecido.

---

## 2. Motores de combustión interna alternativos

---

### 2.1. Introducción

En el presente capítulo se habla de los motores de combustión interna alternativos. La importancia de este capítulo radica en que estos son los motores que dominan el sector de la automoción incluso hoy en día y es el motor utilizado para los ensayos con hidrógeno en el Instituto Universitario CMT-Motores Térmicos. Se explicará el funcionamiento de los motores de encendido provocado y por compresión (MEP y MEC) pero se centrará en los MEP, ya que son los que pueden operar con hidrógeno.

### 2.2. Contexto histórico

Un motor de combustión interna alternativo (MCIA) es esencialmente un conjunto de elementos mecánicos que, mediante un movimiento alternativo (biela manivela), permite obtener energía mecánica a partir de la energía térmica generada por un proceso de combustión en el seno del fluido que lo atraviesa [11]. Su propósito básicamente es la obtención de potencia mecánica a partir de la energía química contenida en el combustible. Dos tipos de MCIA son los que dominan el mercado desde sus inicios, los motores de encendido provocado (MEP) y los motores de encendido por compresión (MEC), también llamados Otto o gasolina y diésel respectivamente. Sus aplicaciones en transporte abarcan tanto tierra como mar y aire gracias a su simplicidad, robustez y alta relación potencia / peso.

Hoy en día los motores de combustión externa prácticamente no se utilizan en comparación con los de combustión interna, pero durante los primeros 150 años de vida de los motores térmicos, la combustión era externa [26]. La combustión del combustible calentaba agua que se convertía en vapor y de forma separada del combustible, el vapor movía el pistón produciendo así el trabajo.

Por primera vez en la década de 1860, se desarrollaron los primeros MCIA. Estos no comprimían el fluido de operación y alcanzaban eficiencias de tan solo 5 % en el mejor de los casos. Afortunadamente, el señor Nicolaus A. Otto introdujo el primer MCIA atmosférico que sí comprimía el fluido y conseguía alcanzar eficiencias de alrededor de 11 %. Para seguir mejorando la eficiencia Otto desarrolló MCIA que contaban con cuatro carreras por ciclo en lugar de dos como lo estaban siendo hasta ahora (el concepto de carreras y ciclos se definen en la 2.3). Esto supuso un antes y un después en la historia de los MCIA debido la enorme mejora en eficiencia, reducción de peso y volumen y asentó las bases de la industria de los MCIA. En la década de los 1880s, varios ingenieros entre los que se incluyen Karl Benz y posteriormente James Atkison, desarrollaron motores de dos carreras sustancialmente mejores a los primeros MCIA de dos carreras.

Hasta ahora, todos estos motores fueron MEP, siendo Otto, al que se considera como el inventor de estos. Fue por primera vez en el año 1892 cuando el ingeniero alemán Rudolf Diesel patentó su concepto de MCIA en el que la ignición del fluido se producía únicamente a través de la compresión del mismo. Consiguió duplicar las eficiencias del resto de MCIA. Desde entonces han habido mejoras tecnológicas progresivas que han mejorado las eficiencias y las potencias pero ninguna ha sido tan trascendental como las mencionadas.

## 2.3. Parámetros básicos del motor

Esta sección pretende cubrir los parámetros fundamentales de los MCIA para que quede clara su definición y evitar confusión cuando se haga mención a ellos en secciones y capítulos posteriores. El estudio de estos no es el foco de este trabajo por lo que no se entrara en detalle y solo se limitara a la definición básica de los parámetros necesarios.

### 2.3.1. Parámetros geométricos

Estos parámetros caracterizan la geometría del motor. La Figura 2.1 muestra el esquema de los MCIA.

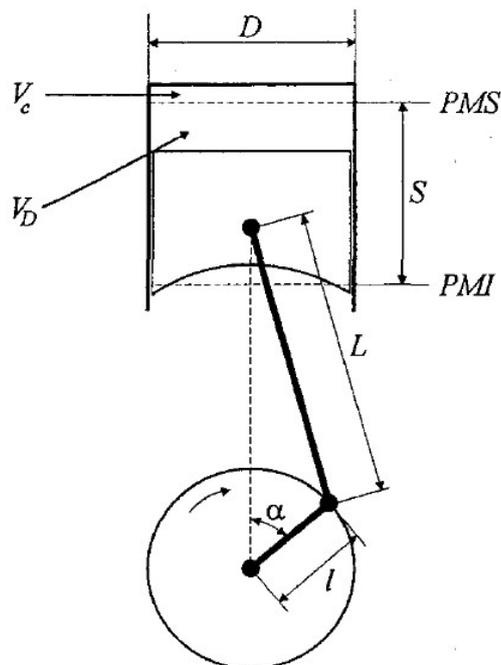


Figura 2.1: Esquema de los MCIA [25]

- $D$  se refiere al diámetro del cilindro.
- $S$  se refiere al carrera del pistón. Equivale a la distancia entre los dos puntos muertos por los que se mueve el pistón.  $PMS$  es el punto muerto superior y

*PMI* es el punto muerto inferior. Se deduce fácilmente que equivale al doble de  $l$ .

- $L$  se refiere a la longitud de la biela, la cual une el bulón del pistón con la muñeca del cigüeñal.
- $l$  se refiere a la longitud de la manivela. Permite la transformación del movimiento traslacional y rotacional de la biela en un solo movimiento rotacional en torno al eje del cigüeñal.
- $V_D$  representa la cilindrada unitaria, es decir, el máximo volumen que recorre el pistón.
- $V_T$  representa la cilindrada total, es decir, la cilindrada total teniendo el cuenta todos los cilindros del motor.
- $V_C$  representa el volumen de la cámara de combustión. Es el volumen que resta.
- **Relación de compresión ( $r_c$ )**. Relación entre el volumen máximo y el volumen mínimo.

$$r = \frac{V_{Max}}{V_{Min}} = \frac{V_D + V_C}{V_C} \quad (2.1)$$

- $\alpha$  es el ángulo de giro del cigüeñal. No obstante, en el apartado 2.3.2 y en el resto del documento,  $\alpha$  se utiliza para definir el grado de carga.

### 2.3.2. Parámetros de funcionamiento

Estos parámetros son de vital importancia porque definen el estado de operación en el que se encuentra el motor. Son variables que pueden medirse experimentalmente y sirven para que el sistema de control del motor determine el punto de funcionamiento en el que se desea operar.

- **Régimen de giro ( $n$ ) y velocidad lineal media del pistón ( $c_m$ )**. Representan la velocidad a la que opera el motor. El régimen de giro es el número de revoluciones que completa el motor por unidad de tiempo y se mide generalmente en revoluciones por minuto (rpm).  $c_m$  representa la velocidad traslacional media del pistón durante la carrera (S) y se relaciona con el régimen de la siguiente manera, sabiendo que una revolución ocupa dos carreras del pistón:

$$c_m = 2 \cdot S \cdot n \quad (2.2)$$

- **Gasto másico de aire ( $\dot{m}_a$ ) y rendimiento volumétrico ( $\eta_v$ )**: el gasto másico de aire se refiere al flujo de aire admitido, normalmente en  $kg/s$ , y el rendimiento volumétrico es un indicador del éxito de llenado del cilindro.

$$\eta_v = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_{a,ref}} \quad (2.3)$$

Donde  $\dot{m}_{a,ref}$  es el gasto máximo de aire que el motor, dadas sus dimensiones, puede aspirar.

- **Caudal de combustible** ( $\dot{m}_f$ ), **relación aire/combustible** ( $AFR$ ) y **relación aire combustible relativa** ( $\lambda$ ):  $AFR$  simplemente representa la relación entre el gasto de aire y el gasto de combustible. Normalmente interesa trabajar con el parámetro  $\lambda$  para que esté sea adimensional con respecto a  $AFR_{est}$ , que es la **relación aire combustible estequiométrica** (la cantidad de aire justa para que todo el combustible se pueda quemar teóricamente y viceversa).  $AFR_{est}$  es una propiedad del combustible.

$$AFR = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} \quad AFR_{est} = \left( \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} \right)_{est} \quad \lambda = \frac{AFR}{AFR_{est}} \quad (2.4)$$

$\lambda$  permite definir dos tipos de mezcla de aire y el combustible. Si  $\lambda > 1$  la mezcla es pobre (exceso de aire) y si  $\lambda < 1$  la mezcla es rica (exceso de combustible). La inversa de  $\lambda$  es el dosado ( $\phi$ ), relaciona la cantidad cantidad de combustible justo con la cantidad de aire para quemar todo el combustible y no más.

$$\phi = \frac{1}{\lambda} = \frac{AFR_{est}}{AFR} \quad (2.5)$$

- **Grado de carga** ( $\alpha$ ): representa relación entre la potencia (par) entregada por el motor y la potencia (par) máxima/o a un determinado régimen de giro.  $\alpha$  se define de forma distinta para los MEP y los MEC. En el caso de los MEP:

$$\alpha = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_{a,max}} \quad (2.6)$$

- **Poder calorífico** ( $PC$ ) y **potencia térmica liberada** ( $\dot{Q}_{lib}$ ):  $PC$  representa la energía química liberada en la combustión si esta es completa y perfecta. Se puede definir en términos máscicos por unidad de masa o en términos volumétricos por unidad de volumen. Ambas definiciones son importantes para combustibles de automoción, donde tanto el peso como el espacio que suponen las partes del vehículo (incluido el combustible) debe ser el mínimo. En los MCIA, se trabaja con la definición de poder calorífico inferior ( $PCI$ ). Esta definición tiene en cuenta que los combustibles forman agua al arder, que esta posee un calor latente de vaporización y que debido a que las temperaturas de escape normalmente son superiores a  $100^\circ\text{C}$  y por tanto el calor de condensación del agua no es aprovechable.

La cantidad de energía química liberada depende sencillamente del  $PC$  y del gasto de combustible:

$$\dot{Q}_{lib} = \dot{m}_f \cdot PC \quad (2.7)$$

Cuanta mayor sea la potencia química liberada, mayor potencia puede entonces ser transformada en potencia útil a través del trabajo mecánico.

- **Recirculación de gases de escape** ( $EGR$ ): se expresa normalmente como porcentaje de los gases de escape que son redirigidos a la admisión. El efecto conseguido es el de la reducción de la temperatura de combustión y como consecuencia una reducción en las emisiones de  $NO_x$ .

- **Ciclos por revolución ( $i$ ):** un ciclo se compone por todas las etapas del motor desde la admisión de aire hasta el escape de gases. Motores de cuatro tiempos (4T) completan un ciclo tras cuatro carreras del pistón (4 desplazamientos verticales entre PMS y PMI). Los motores de dos tiempos (2T) solo necesitan dos carreras. Una revolución del motor ocupa dos carreras. Por lo tanto,  $i$  vale 0.5 para motores 4T y vale 1 para motores 2T.

$$i = \frac{\text{Número de ciclos}}{\text{Revolución}} \quad (2.8)$$

### 2.3.3. Parámetros indicados y efectivos

#### Parámetros indicados

Los parámetros indicados hacen referencia al ciclo cerrado positivo real del motor, también llamado diagrama del indicador. Estos parámetros no tienen en cuenta pérdidas mecánicas o trabajo negativo, si no que dan una idea de lo que ocurre en el cilindro. El diagrama del indicador, como se muestra en la Figura 2.2, es una evolución de la presión en el cilindro en función del volumen, que viene determinado por el movimiento del pistón.

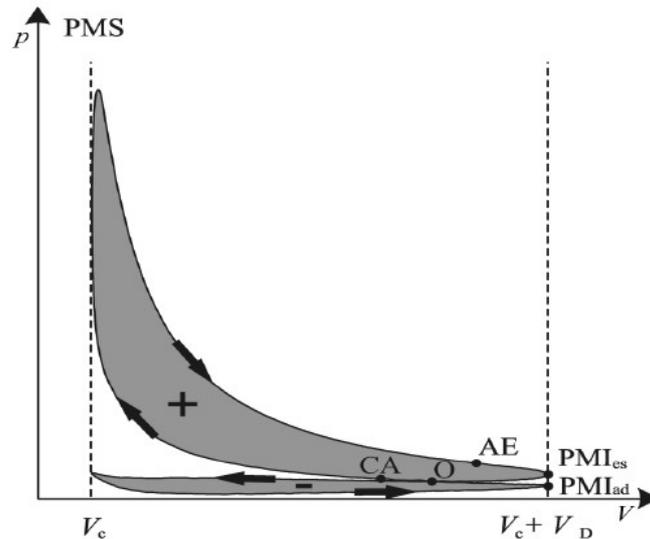


Figura 2.2: Diagrama del indicador [11]

A partir del diagrama, los parámetros más importantes son los siguientes:

- **Trabajo indicado ( $W_i$ ):** es el trabajo producido en el ciclo cerrado positivo. Se calcula sencillamente obteniendo el área encerrada en dicho ciclo mediante integración, siendo  $ad$  y  $es$  abreviaturas de admisión y escape respectivamente.

$$W_i = \int_{PMI_{ad}}^{PMI_{es}} p dV > 0 \quad (2.9)$$

- **Potencia indicada** ( $N_i$ ): equivale a la velocidad de producción de trabajo, es decir, el trabajo por unidad de tiempo.

$$N_i = i \cdot n \cdot W_i \quad (2.10)$$

- **Rendimiento indicado** o **rendimiento térmico** ( $\eta_i$ ): relaciona la potencia indicada desarrollada por el motor con la potencia térmica consumida ( $\dot{Q}_{lib}$ ). Determina que tan eficiente es el ciclo termodinámico. El hecho de que  $\eta_i$  no sea igual a 1 está relacionado con las pérdidas de calor en el cilindro o con la ineficiencia de la combustión.

$$\eta_i = \frac{N_i}{\dot{m}_f \cdot PCI} \quad (2.11)$$

En el ciclo Otto ideal (el ciclo termodinámico ideal que siguen los MEP), el rendimiento indicado es función únicamente de la relación de compresión y del coeficiente adiabático del gas ( $\gamma$ ) tal y como expresa la Ecuación 2.12.

$$\eta_i = 1 - \frac{1}{r_c^{\gamma-1}} \quad (2.12)$$

- **Presión media indicada** ( $PMI$ ): presión constante que durante una carrera produce un trabajo igual al trabajo indicado. Es independiente del tamaño del motor por lo tanto sirve para comparar.

$$PMI = \frac{W_i}{V_D} \quad (2.13)$$

- **Consumo específico indicado** ( $g_i$  o  $ISFC$ ): combustible consumido por unidad de tiempo referido a la potencia indicada desarrollada.

$$g_i = \frac{\dot{m}_f}{N_i} = \frac{1}{\eta_i \cdot PCI} \quad (2.14)$$

### Pérdidas mecánicas

Antes de definir los parámetros efectivos, hay que describir las pérdidas mecánicas. Estas son precisamente la diferencia entre los parámetros indicados y efectivos. Existen tres tipos de pérdidas generales: por bombeo, por fricción y por accionamiento de auxiliares. Las tres pérdidas tienen su trabajo, potencia y presión media asociados pero únicamente las pérdidas por bombeo se calculan a través del diagrama del indicador (2.2), ya que son el área encerrada en el ciclo negativo y corresponden al trabajo realizado por el motor para aspirar el aire. Estas, junto con las pérdidas de calor serán las más relevantes a lo largo del trabajo.

$$W_b = \int_{PMI_{es}}^{PMI_{ad}} p dV < 0 \quad (2.15)$$

## Parámetros efectivos

Estos se refieren al eje del motor. Por lo tanto, necesariamente tienen en cuenta las pérdidas mecánicas mencionadas y los parámetros indicados. Como ya se ha mencionado, se relacionan con los parámetros indicados de la siguiente manera:

$$Par.e = Par.i - \text{Pérdidas mecánicas} \quad (2.16)$$

Los mas relevantes son los siguientes:

- **Potencia efectiva** ( $N_e$ ): Potencia útil disponible para mover el vehículo. Es el producto del par efectivo ( $M_e$ ) generado por el eje y la velocidad de giro del eje ( $\omega$ ).

$$N_e = M_e \cdot \omega = M_e \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \quad (2.17)$$

Una versión muy útil de la fórmula de la potencia efectiva es la de la Ecuación 2.18, porque relaciona muchos de los parámetros clave del motor.

$$N_e = \frac{i \cdot n \cdot \eta_e \cdot \eta_v \cdot \rho_{ref} \cdot V_T \cdot PCI}{\lambda \cdot AFR_{est}} \quad (2.18)$$

- **Potencia específica** ( $N_{esp}$ ): Relación entre la potencia de un motor y su cilindrada total. Permite comparar motores independientemente del tamaño.

$$N_{esp} = \frac{N_e}{V_T} \quad (2.19)$$

- **Rendimiento efectivo** ( $\eta_e$ ): relaciona la potencia efectiva desarrollada por el motor con la potencia térmica consumida.

$$\eta_e = \frac{N_e}{\dot{m}_f \cdot PCI} = \eta_i \cdot \eta_m \quad (2.20)$$

Donde  $\eta_m$  hace referencia al rendimiento mecánico.

- **Trabajo efectivo** ( $W_e$ ): Trabajo efectivo disponible para mover el vehículo.

$$W_e = W_i - W_p \quad (2.21)$$

- **Presión media efectiva** ( $PME$ ): Presión constante que durante una carrera produce un trabajo igual al trabajo efectivo.

$$PME = \frac{W_e}{V_T} = \frac{W_i - W_{pm}}{V_T} \quad (2.22)$$

Donde  $W_{pm}$  hace referencia al trabajo total asociado a las pérdidas mecánicas.

- **Consumo específico efectivo** ( $g_{ef}$ ): combustible consumido por unidad de tiempo referido a la potencia mecánica desarrollada.

$$g_{ef} = \frac{\dot{m}_f}{N_e} = \frac{1}{\eta_e \cdot PCI} \quad (2.23)$$

## 2.4. MEP y MEC

Tras una revisión bibliográfica, se ha visto que en todos los artículos encontrados sobre MCIA operando con hidrógeno como combustible, el motor en cuestión es un MEP. Asimismo, el motor utilizado para los ensayos en CMT-Motores Térmicos es también un MEP. Por ello, es preciso explicar e indagar en el funcionamiento de los MEP, sin dejar de lado una breve introducción de los MEC y su funcionamiento, para así poder posteriormente resaltar las diferencias fundamentales. Una vez las características de los dos tipos de MCIA estén claras, en el Capítulo 4 se procederá a exponer porqué el hidrógeno solo se aplica en los MEP.

La diferencia fundamental entre los dos tipos de motores está en el proceso de combustión. Los MEP disponen de una bujía en la cámara de combustión. En el momento en el que se desea iniciar la combustión, una descarga eléctrica en la bujía produce una chispa que permite la ignición de la mezcla en la zona de la bujía, que seguidamente se propaga con rapidez al resto del cilindro.

Por otra parte, en los MEC, la ignición de la mezcla se consigue gracias al calentamiento de la misma fruto únicamente de la compresión, sin necesidad de un aporte externo de energía como en los MEP. La duración de la combustión en los MEC es más lenta.

### 2.4.1. Funcionamiento de un MEP

Para explicar el funcionamiento de los MEP, es necesario introducir dos conceptos: las fases de los ciclos y el diagrama de distribución. Ambos conceptos se aplican igualmente a los MEC, por eso no se repetirán en el apartado 2.4.3.

#### Fases de los ciclos

Tanto para un motor de 4T como para uno de 2T, existen 4 fases de motor que componen el ciclo: admisión, compresión, combustión y expansión (una fase) y escape, en esta secuencia. **El motor de 4T es el que interesa en este trabajo y con el que se han realizado los ensayos en CMT.** El motor de 4T dedica una carrera a cada una de estas fases, tal y como se muestra en la Figura 2.3, donde la fase *explosión* engloba la expansión y combustión.

La figura es auto-explicativa, pero con objeto de clarificar, en la siguiente lista se resumen los 4 procesos:

- **Admisión:** Ingesta de mezcla de aire y combustible a través de la válvula de admisión que se encuentra abierta. El movimiento descendente del pistón por inercia del cigueñal provoca una depresión que induce la entrada de la mezcla.
- **Compresión:** Compresión del fluido por la reducción de volumen provocada por el movimiento ascendente del pistón. Válvulas cerradas. Compone la mayor parte del trabajo negativo. Aumento no solo de la presión si no también de la temperatura. Cerca del PMS se activa la corriente eléctrica que calienta la bujía y enciende la mezcla.

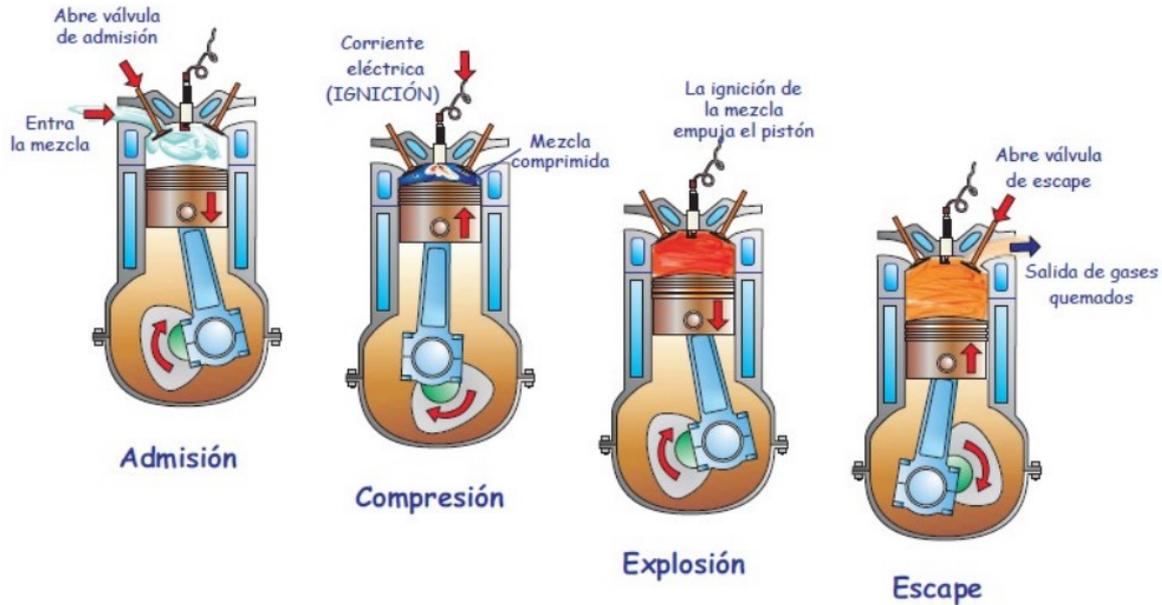


Figura 2.3: Fases del motor en MEP [35]

- Combustión y expansión:** Válvulas aun cerradas. Debido a la combustión hay un gran aumento de la temperatura en el cilindro. La ignición mediante la chispa producida en la bujía hace que la combustión sea rápida y el volumen apenas varíe, debido a esto, el aumento de la temperatura a volumen aproximadamente constante provoca un aumento importante de la presión. Esta consecuencia se deduce fácilmente de la ecuación de estado de gases ideales 2.24.

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (2.24)$$

En la carrera de expansión, la combustión de los gases empuja el pistón hacia el PMI, produciendo trabajo. Es la única fase en la que se genera trabajo.

- Escape:** Con la apertura de las válvulas de escape, se genera una sobre-presión en el cilindro que lleva los gases hacia el conducto de escape. Cuando esta sobre-presión se desvanece, el empuje del pistón hacia el PMS retira el resto de gases quemados, aunque no todos, ya que siempre queda una fracción residual que no se ha conseguido evacuar.

La evolución de la presión y temperatura a lo largo de las fases se representa en el diagrama del indicador 2.2.

### Diagrama de distribución

La compresibilidad del aire, el hecho de que la combustión no sea del todo a volumen constante (es rápida pero no instantánea) y que la apertura y cierre de válvulas tampoco sea instantánea, hace necesario adelantar o retrasar los tiempos de apertura o cierre de las válvulas de admisión y escape respecto a los puntos muertos. El diagrama de distribución (Figura 2.4) representa el diseño de los tiempos de apertura o cierre de las válvulas.

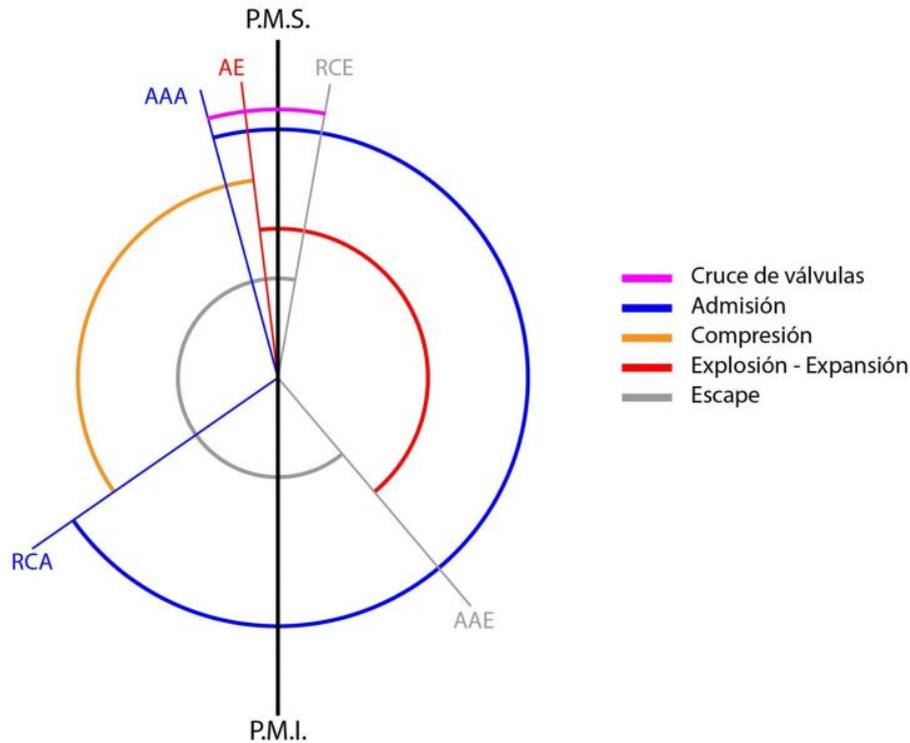


Figura 2.4: Diagrama de distribución [17]

En la leyenda se representan las fases de motor y el **cruce de válvulas**. El cruce de válvulas representa el ángulo girado por el cigüeñal mientras que las válvulas de admisión y escape están al mismo tiempo abiertas y equivale a la suma de los ángulos AAA y RCE, que son definidos a continuación. Si está bien diseñado, sirve entre otras cosas para evacuar los gases de escape residuales debido a la entrada de gases frescos. Los parámetros del diagrama son:

- **Avance en la apertura de admisión (AAA)**. Es el ángulo que gira el cigüeñal desde que se abre la válvula de admisión hasta el PMS. Permite que entre la mayor cantidad de aire posible al asegurar que cuando el pistón está descendiendo a máxima velocidad, la válvula está completamente abierta.
- **Retraso en el cierre de escape (RCE)**. Es el ángulo que gira el cigüeñal desde el PMS hasta que se cierra la válvula de escape.
- **Retraso en el cierre de admisión (RCA)**. Es el ángulo que gira el cigüeñal desde el PMI hasta que se cierra la válvula de escape. Aprovecha la inercia del aire entrante al inicio de la fase de compresión.
- **Avance al encendido (AE)**. También podría haberse representado el **Avance a la inyección (AI)**. Representan el ángulo que gira el cigüeñal desde el salto de la chispa o el inicio de la inyección de combustible, respectivamente, y el PMS. El AE es un parámetro exclusivo de los MEP. El resto se aplican también en los MEC.

- **Avance en la apertura de escape (AAE).** Es el ángulo que gira el cigüeñal desde la apertura de la válvula de escape hasta el PMI. Facilita la evacuación de gases ya que la válvula está completamente abierta en la fase de escape, de esta forma se reduce las pérdidas por bombeo. El óptimo se determina considerando el compromiso entre reducir las pérdidas por bombeo y reducir las el trabajo obtenido en la expansión.

De todos estos, el AE y el AI son de mayor relevancia en este trabajo. En la sección siguiente, se explican más detalladamente.

## 2.4.2. Combustión en MEP

Las 4 fases de motor son de vital importancia en la operación del motor, pero es en la etapa de combustión y expansión en la única donde se produce el trabajo. Además, el estudio de la combustión, es precisamente la labor que se llevará a cabo en CMT-Motores térmicos cuando se ensaye con hidrógeno en un MEP. Por ello, conocer como es la combustión en un MEP es de especial relevancia en este capítulo.

La combustión se define como la transformación en calor de la energía almacenada en los enlaces químicos de determinadas sustancias (los combustibles), durante su proceso de oxidación. En los MEP, la mezcla es homogénea o heterogénea, dependiendo del tipo de inyección. Esto se discutirá en la sección 2.5. En cualquier caso, como ya se ha mencionado con anterioridad, el inicio de la combustión es provocado por el salto de una chispa, causada por una descarga eléctrica en la bujía. Por lo tanto, el inicio de la combustión debe ser controlado y no espontáneo; el autoencendido (encendido espontáneo debido a temperatura elevada) debe evitarse. Cuando el autoencendido se produce en los MEP, se le denomina **detonación**. Los combustibles en MEP, deben tener una alta resistencia a la inflamación, es decir, un alto índice de octano, para evitar precisamente el encendido espontáneo. Además, la combustión es subsónica; es una **deflagración**.

Tras la inflamación, se genera una llama turbulenta. El frente de llama se propaga a través de la mezcla entre aire y combustible además de gases quemados hasta que alcanza las paredes de la cámara de combustión donde se extingue. La evolución del frente de llama así como las diferentes secciones de mezcla (quemada y sin quemar) se representa en la Figura 2.5. La energía térmica liberada en la combustión origina un aumento de la presión, como ya se ha mencionado y se observa en el diagrama del indicador (Figura 2.2). A partir del incremento de presión, se puede determinar la **cantidad de calor liberado** (QL) y teniendo en cuenta el poder calorífico del combustible, se puede obtener **cantidad de masa quemada** (MQ). Si ambas cantidades se normalizan con la totalidad de calor liberado o masa quemada, se obtienen la **fracción de masa quemada** (FMQ) y la **fracción de calor liberado** (FQL) respectivamente. Sus derivadas representan la tasa de combustión, haciendo referencia al calor liberado o la masa quemada. Estas son la **Derivada de la fracción de calor liberado** (DFQL) y la **Derivada de la fracción de masa quemada** (DFMQ).

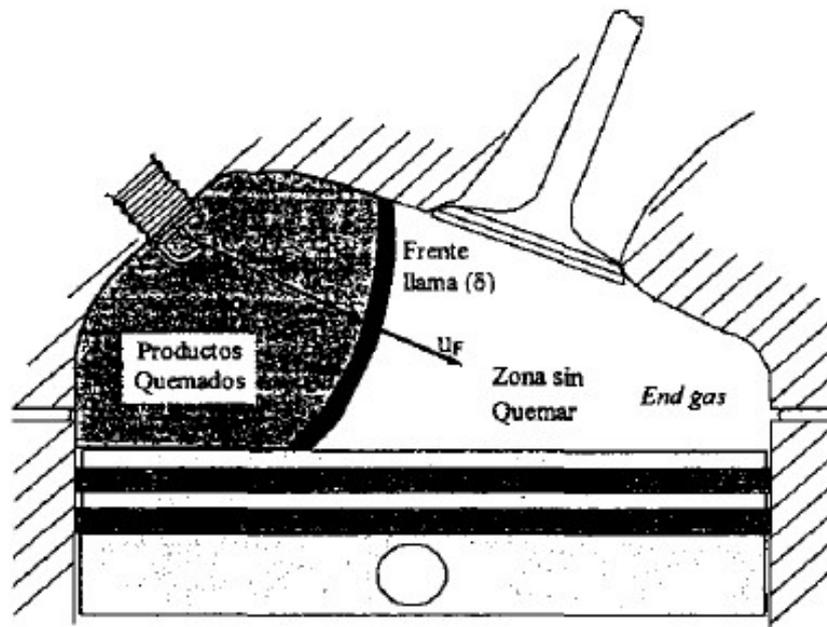


Figura 2.5: Avance del frente de llama en MEP [25]

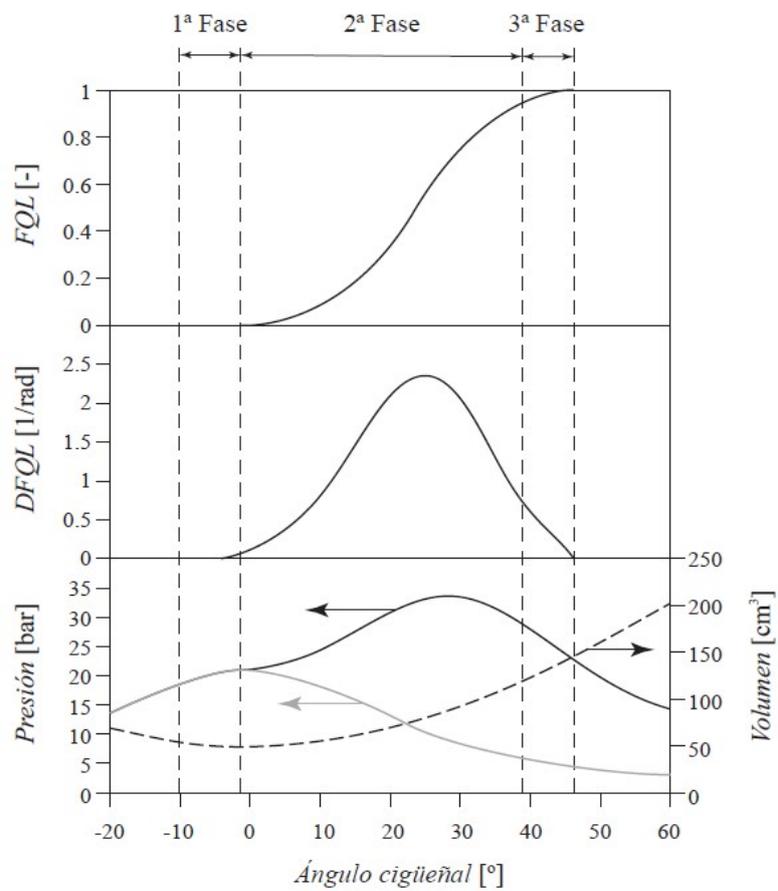


Figura 2.6: Fases de la combustión [25]

## Fases de la combustión

Con el análisis de la presión en el cilindro y las cantidades de calor liberado y masa quemada presentadas, es posible dividir el proceso de combustión en tres fases en función del ángulo de giro del cigüeñal. Estas fases, se representan en la Figura 2.6.

En la primera fase la liberación de energía es poca y la temperatura de la mezcla baja. Está muy condicionada por el proceso de ignición y es la responsable de la inestabilidad de combustión, por lo que su estudio es importante. La velocidad de propagación es baja; la velocidad de combustión es laminar. Cuando el efecto de la presión comienza a percibirse en el resto de la cámara, empieza la segunda fase.

La segunda fase libera la mayor parte de la energía. Esta fase es mucho más rápida, el aumento de la presión es súbito. Esto se debe al efecto combinado de mayor superficie de llama, mayor temperatura de la mezcla sin quemar e incremento de la velocidad de combustión debido a mayor efecto de la turbulencia. Induce la producción de  $NO_x$  y puede también inducir el autoencendido en las zonas sin quemar debido al aumento de la temperatura. Esta fase termina normalmente cerca del PMS, cuando el frente se acerca a las paredes y como la superficie de llama empieza a reducirse, la propagación de la llama también se ralentiza.

La tercera fase termina cuando finaliza el proceso, que puede darse por efecto pared. Esta fase esta asociada a la producción de hidrocarburos sin quemar.

## Factores que afectan a la combustión

A continuación se explica la influencia que tienen los parámetros mas relevantes sobre el proceso de combustión.

- **Instante de encendido (AE) y centrado de la combustión.** Determina la cantidad de mezcla que se quema durante la carrera de compresión y cuanta en la de combustión, es decir, antes y después del PMS. Cuanto más masa se quema antes del PMS, más aumenta la presión y temperatura máximas. A medida que se avanza el encendido, la  $PME$  aumenta hasta alcanzar un máximo (el óptimo) y a partir de aquí seguir avanzando reduce la  $PME$ . Cuando el avance es pequeño, la presión en el interior del cilindro sube demasiado tarde, de manera que no se saca el máximo provecho de la combustión. Cuando el avance es excesivo, la presión en el cilindro se eleva demasiado pronto, dificultando incluso la subida del pistón al final de la fase de compresión. El AE óptimo es el que produce mayor  $PME$ , a este se le denomina *Maximum brake torque timing (MBT)*.
- **Régimen de giro (n).** El aumento n significa que el ángulo correspondiente a la primera fase de la combustión ( $\alpha_{c1}$ ) aumenta porque la velocidad de combustión laminar ( $u_{cl}$ ) permanece constante (no depende de n). Es decir, el motor gira mas rápido pero la velocidad de combustión es la misma para la primera fase, por lo tanto la primera fase ocupa un mayor ángulo de giro del cigüeñal. Lo mismo ocurre con la tercera fase, ya que la velocidad de combustión durante esta es también laminar. El ángulo de giro del cigüeñal asociado a la segunda fase no se ve afectado porque la velocidad de combustión en esta es turbulenta y sí depende de n (aumenta con n). Globalmente, esto quiere decir que el aumento de n implica un aumento del ángulo de la combustión ( $\alpha_c$ ). Por lo tanto, al aumentar

no es necesario incrementar el AE para seguir en *MBT*. A partir de cierto régimen, debido al aumento de la turbulencia, no es necesaria aumentar el AE.

- **Grado de carga.** Menor grado de carga, mayor proporción de gases residuales debido a la despresurización del colector de admisión [25]. Esta mayor proporción reduce la  $u_c$  y por lo tanto  $\alpha_c$  incrementa, haciéndose necesario una vez más el aumento de AE.
- **Relación aire combustible relativa ( $\lambda$ ).** La temperatura de combustión es máxima cuando esta es ligeramente rica ( $\lambda$  algo inferior a 1). Cuanto mayor es la temperatura, mayor es  $u_c$  y por lo tanto menor es  $\alpha_c$ . Lejos del *AFR* de máxima temperatura,  $\alpha_c$  crece y se hace otra vez necesario aumentar AE.

### Casos particulares

Los siguientes fenómenos son casos particulares pero comunes (sobre todo la dispersión cíclica) que no deben pasarse por alto.

**Dispersión cíclica.** Es a lo que se refiere por inestabilidad de la combustión, que como se ha mencionado, es provocada por la primera fase de la combustión. Consiste en la diferencia de la evolución de la presión en el cilindro para ciclos adyacentes con las mismas condiciones de funcionamiento. Es más acentuada en mezclas pobres, se incrementa con la presencia de *EGR* y se reduce con el aumento de la turbulencia. Las diferencias en el patrón de flujo en la zona de la bujía y una posible baja energía o tiempo de encendido son las causas de la dispersión. Las consecuencias no son irrelevantes ya que aumentan las emisiones, el ruido, la incomodidad del usuario y reducen la *PME*.

**Apagado de la llama.** Es un caso extremo de la dispersión cíclica (mezclas muy pobres). Puede haber un quemado parcial de la mezcla o directamente un fallo de encendido. También se puede dar cuando la llama está muy próxima a la pared.

### 2.4.3. Funcionamiento de un MEC

Los motores de encendido por compresión, como se ha mencionado en la introducción 2.2, tienen mayor rendimiento que los MEP. Esto se debe a que el motor opera con mayor relación de compresión, lo cual es posible porque en la carrera de compresión solo se comprime el aire (el combustible se inyecta al final de la carrera de compresión). Es por esto que la mezcla en la combustión es más heterogénea que en los diésel, lo cual lleva a la aparición de múltiples frentes de llama. La combustión se inicia por autoencendido debido a las altas temperaturas provocadas por la compresión.

### 2.4.4. Diferencias fundamentales entre MEP y MEC

Las diferencias entre MEP y MEC no se limitan solamente al proceso de combustión, pero las demás diferencias, que son expuestas en este apartado, son consecuencia de la diferencia en la combustión.

**Formación de la mezcla.** Tanto si se inyecta en el colector de admisión como si se inyecta en el cilindro (inyección directa), el tiempo para que el combustible se mezcle antes de la combustión es mayor en los MEP que en los MEC, porque en estos últimos, el combustible siempre se inyecta al final de la carrera de combustión. Por lo tanto, en los MEP se consigue fácilmente la homogeneidad de la mezcla mientras en los MEC es más difícil y lo que se tiene es una mezcla heterogénea.

**Regulación de la carga y relación aire/combustible.** La regulación de la carga se refiere a la regulación de la potencia. En los motores de inyección indirecta (inyección en el colector de admisión) el objetivo es formar una mezcla homogénea, por lo cual  $\lambda$  debe variar muy poco respecto al estequiométrico ( $\lambda = 1$ ). Por lo tanto, en la misma proporción que se varía el combustible debe variarse el aire admitido. Esto se hace mediante una válvula de estrangulación (mariposa) que modifica la presión de admisión y por lo tanto la densidad (cantidad) de mezcla admitida (regulación cuantitativa). En los motores de inyección directa, la regulación es cuantitativa también pero generalmente un 40 % del control está asociado a la inyección y el resto a la mariposa [25]. Por otra parte, en los MEC, el  $\lambda$  en el que se puede producir la combustión es más amplio, así que la regulación de la carga se hace modificando  $\lambda$ . El aire admitido siempre es el máximo (no tiene válvula de estrangulación) por lo que a bajas cargas los MEC se evitan las pérdidas asociadas a la estrangulación de la mezcla que tienen los MEP.

**Cámaras de combustión.** La diferencia clave reside en el volumen de la cámara de combustión ( $V_c$ ) respecto al del cilindro ( $V_D$ ). Los MEP, deben evitar el autoencendido y por ello operan con relaciones de compresión (2.1) menores a los MEC. Además, los MEC necesitan diseños mucho más extravagantes para ayudar en lo máximo posible con la rápida mezcla del combustible con el aire.

**Tipos de combustible.** La resistencia al autoencendido es la propiedad del combustible que determina para que tipo de motor sirve. Los MEP necesitan alta resistencia y los MEC muy baja. Esto se traduce en que se requiere un alto índice de octano y un alto índice de cetano, respectivamente. Los MEC tienen que considerar adicionalmente la viscosidad del combustible debido a su influencia en la inyección y formación de la mezcla.

**Potencia y rendimiento.** En los MEC es más difícil operar con  $\lambda$  cercanos al estequiométrico. Se opera con  $\lambda$  pobres. Por esta razón no son capaces de utilizar todo el aire admitido para quemar combustible. Los MEP operan con  $\lambda$  cercanos al estequiométrico; utilizan mayor proporción del aire admitido para quemar el combustible. Es decir, a igual cilindrada ( $V_D$ ), un MEP produce mayor potencia que un MEC. Contrariamente, el mejor rendimiento lo tienen los MEC debido a que operan con mayor relación de compresión.

Las diferencias se resumen en la Tabla 2.1. El régimen de giro máximo se refiere a los vehículos de automoción y las características de los MEP hacen referencia a los MEP convencionales (inyección indirecta). En la sección 2.5 se tratan en detalle las diferencias entre inyección directa e indirecta.

Característica	MEP	MEC
Formación de la mezcla	Admisión / Compresión	Final de la compresión
Encendido de la mezcla	Mediante una chispa	Autoencendido
Regulación de la carga	Cuantitativa (mezcla)	Cualitativa (combustible)
Combustibles	Ligeros	Pesados
Fluido operante	Aire + combustible	Aire
Relación de compresión	9-11	12-22
Régimen de giro máximo	7500 rpm	5000 rpm
Dosado	Alrededor de 1	< 0.95 (global)

Cuadro 2.1: Diferencias entre MEP y MEC [11]

## 2.5. Inyección indirecta e inyección directa

En este capítulo se ha mencionado la inyección indirecta y la inyección directa pero no se han tratado con más detalle. **El motor utilizado en los ensayos con hidrógeno en CMT-Motores térmicos es un MEP de inyección directa.** Así pues, conviene destacar sus características y compararlas con la inyección indirecta.

### Inyección indirecta o inyección en puerto

Los motores con inyección indirecta, también denominada como **inyección en puerto** o *Port fuel injection (PFI)* en inglés, **inyectan el combustible fuera de la cámara de combustión**, normalmente en el colector de admisión. De esta forma el combustible se mezcla mejor con el aire antes de la combustión. Los colectores se diseñan rugosos para generar más turbulencia. Esta estrategia ofrece peor consumo de combustible debido a que tiene mayores pérdidas de calor por la paredes del cilindro (debido a que este está más repartido), permite menores relaciones de compresión y la temperatura en el colector es ligeramente mayor. Además es el funcionamiento es menos estable porque el arranque en frío es más difícil y el suministro de combustible no es tan exacto (menos estable a carga baja).

Las ventajas mas importantes son que producen menos  $NO_x$  en la combustión debido a que la mezcla es muy homogénea, son más económicos de construir y exigen menos mantenimiento .

### Inyección directa

Los motores con inyección directa **inyectan el combustible en la cámara de combustión**. Así se controla de forma exacta la cantidad que se inyecta. Las desventajas son que la combustión produce más  $NO_x$ , son más costosos de fabricar y requieren más mantenimiento por ensuciamiento.

Contrario a la inyección indirecta, la directa tiene, generalmente, menor consumo de combustible (menos pérdidas de calor y relación de compresión más alta). También es más estable, mejor arranque en frío y es estable a ralentí más bajos debido a la mayor precisión de la cantidad inyectada.

---

## 3. Operación con hidrógeno

---

### 3.1. Introducción

En este capítulo se describirán las implicaciones que tiene utilizar hidrógeno como combustible en un vehículo de automoción, desde su integración en el vehículo hasta la operación del motor. Se listarán las propiedades físicas y químicas del hidrógeno frente a las del combustible por excelencia de los MEP: la gasolina. Se discutirá si las propiedades son ventajosas o inconvenientes de cara a la aplicación en MCI. En este capítulo se relacionarán los conceptos vistos en el Capítulo 2, aplicándolos a la utilización de hidrógeno.

### 3.2. Propiedades físico-químicas del hidrógeno

En la Tabla 3.1 se resumen las propiedades más relevantes del hidrógeno y también las de la gasolina con objeto de comparar ambos combustibles. NTP quiere decir *Normal temperature and pressure*, es decir, temperatura de 293.15K o 20°C y presión de 1 atm.

Propiedad	Hidrógeno	Gasolina
Fórmula química	$H_2$	$C_8H_{18}$
Temperatura de autoignición (°C)	571	280
Temperatura adiabática de la llama (°C)	2254	2138
Poder calorífico inferior ( $MJ/kg$ )	120	45
Densidad gaseosa ( $kg/m^3$ )	0.08	-
Densidad líquida	71	730
<i>AFR</i> estequiométrico	34.2	14.7
Dosado estequiométrico	0.029	0.0664
Composición estequiométrica (% en volumen)	29.53	1.65
Límites de inflamabilidad ( $\lambda^*$ )	10 - 0.14	1.43 - 0.25
Límites de inflamabilidad ( $\phi^*$ )	0.1 - 7.1	0.7 - 4
Energía mínima de ignición ( $mJ$ )	0.02	0.25
Distancia mínima de apagado ( $mm$ )	0.64	2
Velocidad de combustión laminar en NTP ( $m/s$ )	1.9	0.37 - 0.43
Velocidad de la llama en NTP ( $m/s$ )	2.65 -3.25	0.3 - 0.5

Cuadro 3.1: Propiedades del hidrógeno y la gasolina [41, 46]

A continuación, en las siguientes secciones del capítulo se van a explorar las implicaciones que suponen cada una de estas propiedades en un vehículo de automoción, relacionadas con la integración en el vehículo, las prestaciones y las emisiones.

Antes de continuar, cabe destacar la temperatura de autoignición del hidrógeno. Esta propiedad revela por fin porqué en la revisión bibliográfica solo se encuentra

hidrógeno en MEP. La temperatura de autoignición del  $H_2$  es excesivamente alta. Por lo tanto, es muy difícil que pueda inflamarse únicamente gracias a las temperaturas alcanzadas durante la carrera de compresión. La combustión por autoinflamación es entonces un proceso de combustión inviable. Por ello, el  $H_2$  en MCIA, se aplica solamente en los MEP.

### 3.3. Integración en el vehículo

En la Tabla 3.1, se tiene que el  $PCI$  del  $H_2$  es más de un 250% del  $PCI$  de la gasolina. Es decir, el  $H_2$  tiene notablemente mayor densidad energética. Un kilo de  $H_2$  en el depósito puede por tanto transportar una distancia superior a la de un kilo de gasolina. No obstante, tanto la densidad gaseosa como la densidad líquida del  $H_2$  (hidrógeno criogénico) son tristemente inferiores a la gasolina. Esto tiene dos implicaciones importantes. La primera es que se necesitan tanques más grandes y comprimidos o incluso criogénicos, para almacenar el hidrógeno en el vehículo. Lo cual supone mayor peso, coste y complejidad. Pero aún aplicando estas condiciones y a pesar del mayor  $PCI$ , el rango de un vehículo de hidrógeno con el depósito lleno se queda muy corto del vehículo convencional con gasolina. La segunda es que la **potencia específica** es a priori menor también, porque en el propio cilindro del motor cabe muy poco hidrógeno. Esta implicación se analiza más en detalle en el apartado 3.4.

### 3.4. Prestaciones

El análisis de la influencia de las propiedades del hidrógeno en las prestaciones se ha dividido en potencia y rendimiento. Aunque en muchas ocasiones están relacionadas, es importante distinguir entre las dos características. En la discusión sobre la regulación de la carga 3.6, se describen dos métodos que pueden ser combinados en términos de potencia y rendimiento

#### 3.4.1. Potencia

La potencia de los MEP con hidrógeno está severamente limitada por el rendimiento volumétrico. **La potencia efectiva en un MCIA, es directamente proporcional al rendimiento volumétrico** (2.18) y como ya se ha mencionado, la densidad del  $H_2$  es el primer indicador del bajo  $\eta_V$  obtenido. Asimismo, la composición estequiométrica como % en volumen (3.1), es una propiedad que permite visualizar mejor el problema. Para una mezcla estequiométrica, casi un 30% del volumen del cilindro es ocupado por el  $H_2$ , frente a un 1.65% que ocupa la gasolina. Por lo tanto, la cantidad de aire que es capaz de ingerir un MEP con hidrógeno por unidad de masa de hidrógeno, es mucho menor que la de la que la cantidad de aire que puede ingerir un MEP convencional (para el caso de inyección en puerto en ambos).

En la Figura 3.1 se compara la potencia específica para distintos modos de inyección entre gasolina, hidrógeno e hidrógeno criogénico y dadas unas condiciones de operación. Se observa que con inyección en puerto (PFI), el motor con hidrógeno produce una potencia específica un 17% inferior al motor de gasolina. Esto se debe al menor rendimiento volumétrico. Los factores que evitan que esta pérdida sea incluso mas grande son el mayor  $PCI$  y  $AFR_{est}$  del  $H_2$  (necesita menos combustible por kilo de aire).

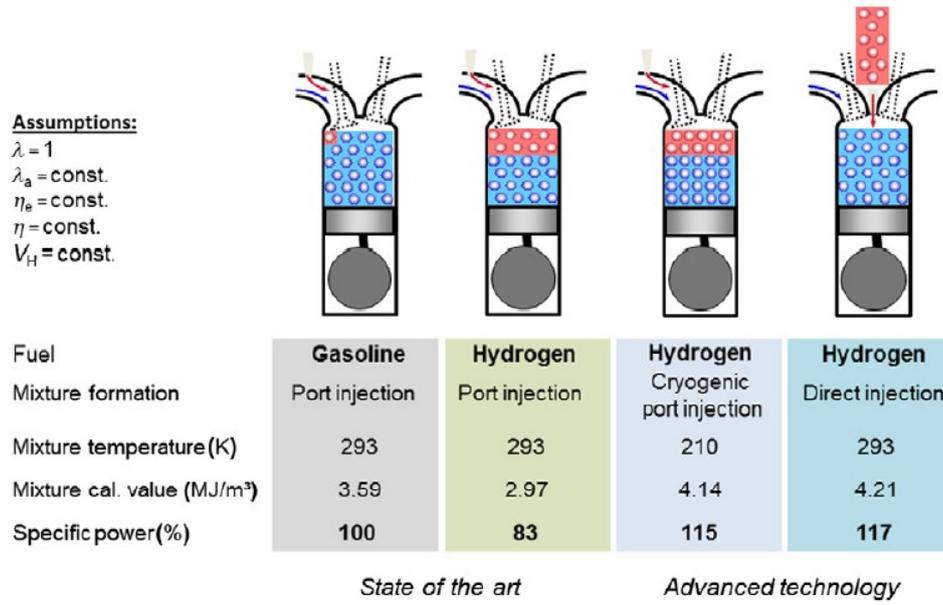


Figura 3.1: Potencia específica de  $H_2$  para diferentes conceptos de formación de mezcla [46].

Por otra parte, con hidrógeno criogénico vemos que sí se consigue superar a la gasolina en un 15% debido a la mayor densidad en comparación con el  $H_2$  gaseoso. Por último, si se cambia a inyección directa y asumiendo que esta se realiza de cara al final de la carrera de compresión, se consigue una potencia específica de un 17% superior a gasolina. Esta última suposición es necesaria ya que para mejorar el rendimiento volumétrico con la inyección directa, es preciso que el hidrógeno no tenga tiempo para desplazar el aire en el cilindro. Si el  $H_2$  se inyecta pronto en la compresión o en puerto, debido a su baja densidad desplaza el aire, reduciendo la cantidad de aire que puede admitir el motor.

### 3.4.2. Rendimiento térmico

En el marco medioambiental en el que se sitúa este trabajo, el rendimiento del motor es tan o incluso más importante que la potencia. Porque un motor con alto rendimiento consume menos combustible y por lo tanto contribuye a producir menos emisiones. Además, la operación del vehículo es más económica porque hay que repostar la misma cantidad de combustible con menos frecuencia.

**El rendimiento térmico ( $\eta_i$ ) de los MEP con hidrógeno puede ser muy superior a los MEP convencionales con gasolina gracias a la posibilidad**

**de poder operar con mezclas pobres y ultra pobres ( $\lambda \gg 1$ ) y permitir mayores relaciones de compresión.** Un mayor rendimiento térmico implica un mayor rendimiento efectivo del motor (2.20). A continuación, se procede a explicar porqué operar con dosados pobres permite un rendimiento superior y posteriormente de describen las propiedades del hidrógeno que ofrecen esta posibilidad.

Para entender porqué la combustión pobre (combustión con mezclas pobres) es tan beneficioso para el rendimiento del motor, hay que referirse a la fórmula del rendimiento bajo condiciones de ciclo Otto ideal (2.12). Se deduce que para aumentar el rendimiento se puede actuar en los dos parámetros ( $r_c$  y  $\gamma$ ), incrementándolos. Las mezclas pobres, al contener mayor proporción de aire, tienen mayor coeficiente adiabático ( $\gamma$ ) [46]. Por el mismo motivo, la mezcla puede aguantar mayor relación de compresión ( $r_c$ ). Así pues, el rendimiento ideal del motor es mayor cuando se opera con mezclas pobres. Esta es una de las razones por las que los MEC ofrecen mayor rendimiento que los MEC convencionales.

El hidrógeno, al tener tan alta temperatura de autoinflamación, permite operar con mayores relaciones de compresión, pero, ¿qué permite al hidrógeno operar con mezclas muy pobres? Principalmente, sus límites de inflamabilidad (el rango de  $\lambda$  en el que puede inflamarse el combustible). El del hidrógeno es mucho más amplio que el de la gasolina: 10 - 0.14 y 1.43 - 0.25 respectivamente. Por lo tanto, el hidrógeno es capaz de iniciar la combustión a  $\lambda$  muy altos (mezclas muy pobres).

Sin embargo, para que la combustión sea lo mas eficiente posible, esta debe parecerse lo máximo posible a la combustión ideal del Ciclo Otto, es decir, combustión a volumen constante, o lo que es lo mismo, combustión rápida. Cuanto más se aleja la combustión de estas condiciones ideales, mayores son las pérdidas y menor es el rendimiento. Por esto hay que considerar otras propiedades: la velocidad de combustión laminar y la velocidad de la llama.

La velocidad de combustión laminar del  $H_2$  es hasta más de 4 veces la de la gasolina (Tabla 3.1). Esta velocidad está relacionada con la consistencia de la mezcla, cuanto más alta es, mejor es la consistencia de la mezcla y más fácilmente se mezcla el  $H_2$  con el aire, pudiendo alcanzar más rápidamente la mezcla pobre deseada.

La velocidad de la llama define la velocidad de combustión, así que se busca también que esta sea lo más rápida posible y en el caso del  $H_2$  lo es hasta más de 8 veces la de la gasolina. Esto indica que la combustión con  $H_2$ , para un mismo  $\lambda$ , se acerca más a la hipótesis de combustión a volumen constante y por lo tanto, las pérdidas por el escape son menores y el rendimiento es mayor. Hay que tener en cuenta que las velocidades de llama disminuyen cuanto más pobre es la mezcla. Aun así, como se observa en la Figura 3.2, hasta con  $\lambda$  igual a 2, el  $H_2$  se quema más rápido que la gasolina y el metano en su máxima velocidad dada por el  $AFR_{est}$ .

Hasta aquí en términos de rendimiento térmico todo han sido ventajas. **El principal problema asociado al rendimiento térmico cuando se opera con hidrógeno son las pérdidas de calor a través de las paredes del cilindro.** Este fenómeno se acentúa con hidrógeno debido a la corta distancia mínima de apagado, que es casi 4 veces inferior a la de la gasolina, y a la alta temperatura adiabática de la llama (Tabla 3.1). Cuanto menor es esta distancia, más se acerca la llama a las paredes y en

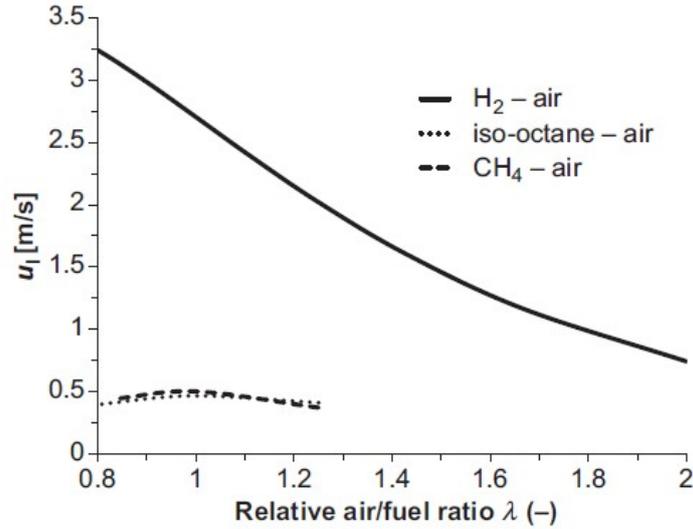


Figura 3.2: Velocidad de combustión laminar de  $H_2$  comparado con gasolina y metano [10, 28].

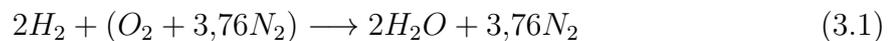
consecuencia, mayores son las pérdidas de calor.

Una buena estrategia para minimizar las pérdidas de calor por las paredes del cilindro es estratificar la mezcla. La estratificación de la mezcla consiste en tener una mezcla estequiométrica o rica alrededor de la bujía y una mezcla ultra pobre cerca de las paredes del cilindro. El rendimiento térmico del motor se beneficia de esta configuración debido a una eficiencia de combustión y una reducción de las pérdidas por transferencia de calor hacia las paredes [46].

Entre los casos prácticos de la bibliografía que confirman la teoría expuesta en esta sección se tiene que: Soberanis and Fernandez [42] reportaron que la eficiencia térmica de un motor aumentaba con hidrógeno como combustible (38.9% con  $H_2$  y 25% con gasolina). Subramanian et al. [43] reportaron que la adición de hidrógeno aumenta considerablemente la presión en el cilindro y que el pico de presión se desplaza gradualmente hacia el PMS. Esto indica que la combustión en el cilindro ocurre en condiciones de mayor presión debido mayoritariamente a la alta temperatura adiabática de la llama y la alta velocidad de la llama.

### 3.5. Emisiones

Debido a la ausencia de carbón en la composición del  $H_2$ , la combustión con  $H_2$  solamente produce cantidades ínfimas de  $CO_2$ ,  $CO$  y UHC que se atribuyen a la quema del aceite lubricante del motor. La combustión completa de  $H_2$  solamente produce vapor de agua y nitrógeno, como se observa en la Ecuación 3.1



Sin embargo, también aparecen los  $NO_x$  y son las únicas emisiones importantes de la combustión de  $H_2$ . Los  $NO_x$  son sencillamente el conjunto de óxidos de nitrógeno y su presencia en el aire que se respira puede ser muy perjudicial para la salud ya que incluso contienen partículas cancerígenas. Se producen por la combustión no ideal. La combustión ideal del hidrógeno en aire solamente debería producir vapor de agua y nitrógeno. El vapor de agua como producto de la combustión y el nitrógeno por formar parte del aire. No obstante, la combustión ideal no existe y cuando la mezcla tiene exceso de aire ( $\lambda > 1$ ) y las temperaturas son lo suficientemente altas, el nitrógeno reacciona con el oxígeno produciendo los  $NO_x$ . Es decir, los  $NO_x$  se producen cuando hay exceso de aire y altas temperaturas en el cilindro. Es por esto que los motores diésel son más conocidos por las emisiones de  $NO_x$  que los motores de gasolina, porque operan con mezclas pobres.

El  $H_2$  tiene una temperatura adiabática de la llama superior a la de la gasolina (Tabla 3.1). Por lo tanto, operando con un mismo  $\lambda > 1$ , el motor de hidrógeno tiene la desventaja de producir mayor cantidad de  $NO_x$ . Apostolescu and Chiriac [7] investigaron las prestaciones en un MEP monocilíndrico a media y baja carga. Los resultados revelaron que con la adición de hidrógeno, las emisiones de  $NO_x$  incrementaron y las de UHC se redujeron. Un MEP convencional opera con carga estequiométrica o ligeramente rica, pero siempre existen zonas pobres locales y además la combustión nunca es perfecta. Al añadir  $H_2$  al combustible la temperatura de combustión aumento y por eso aumentaron también las emisiones de  $NO_x$ .

Hasta aquí se ha presentado el  $H_2$  como una desventaja en términos de  $NO_x$  por su mayor temperatura de combustión. Sin embargo, es importante recordar que debido sus los amplios límites de inflamabilidad, el  $H_2$  puede operar con mezclas pobres y ultra pobres. Operando con estas mezclas, la temperatura de combustión se reduce considerablemente tal y como se muestra en la Figura 3.3.

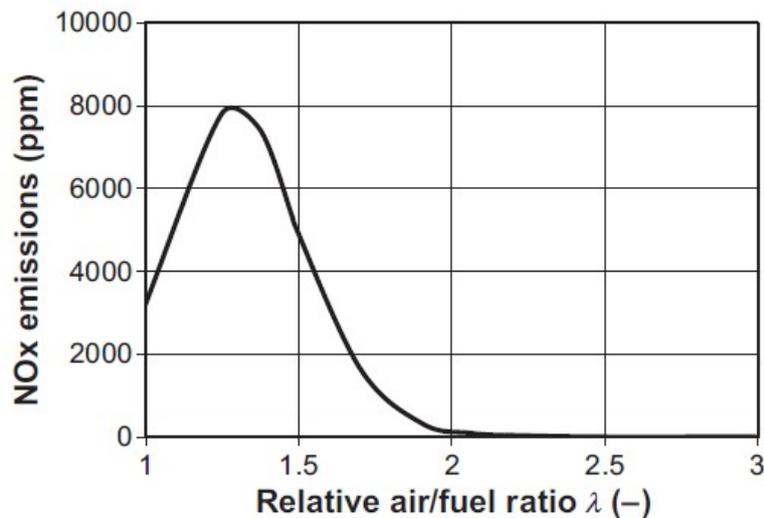


Figura 3.3: Emisiones de  $NO_x$  para mezclas homogéneas de  $H_2$  y aire en función de  $\lambda$  [46].

Se observa que el pico de las emisiones de  $NO_x$  se encuentra en torno a  $\lambda = 1,3$ . Este se reduce hacia  $\lambda$  estequiométricos debido a que hay menor  $O_2$  para oxidar con  $N_2$  y se reduce hacia mezclas más pobres por la menor temperatura, alcanzando valores casi nulos para  $\lambda > 2$ . Así pues, **la combustión pobre no solamente es capaz de aumentar el rendimiento térmico del motor debido a mayor  $\gamma$  y mayor relación de compresión permitida si no que también es un medio para minimizar las emisiones de  $NO_x$  a través de la reducción de la temperatura de combustión.**

### 3.6. Regulación de la carga

En un MEP convencional, como se ha comentado en la sección 2.4.4, para la regulación de la carga (variación de la posición del pedal acelerador) se utiliza una válvula mariposa que regula de forma cuantitativa la carga del motor. Se regula la cantidad de mezcla, manteniendo un  $AFR$  constante alrededor del estequiométrico. La estrangulación genera una resistencia en el flujo de mezcla que se representa por trabajo de bombeo del motor, asociado a las pérdidas mecánicas, por lo que el uso de la válvula mariposa conlleva unas pérdidas y reducción del rendimiento adicional. Estas pérdidas son mayores a bajas cargas cuando la estrangulación es máxima (válvula muy cerrada). A altas cargas la válvula está prácticamente abierta por lo que las pérdidas son muy pequeñas.

Los amplios límites de inflamabilidad del  $H_2$  ofrecen una ventaja en términos de regulación de la carga, ya que permiten una estrategia de regulación cualitativa (variando el  $AFR$ ), evitando tener una válvula mariposa. A cargas bajas entonces, si se opera con  $AFR$  muy pobres ( $\lambda \gg 1$ ), se obtienen: los beneficios de mejora en el rendimiento mecánico de la regulación cualitativa, la mejora en el rendimiento térmico por operar con mezclas pobres expuestos en el apartado 3.4.2 y la reducción de las emisiones de  $NO_x$  que conlleva la combustión pobre (3.5).

Otro método de reducir la potencia para la operación a bajas cargas sin estrangulación es, el aumento del  $EGR$ . La presencia de gases inertes en el cilindro, lógicamente reduce la cantidad de aire y combustible y por lo tanto la potencia producida. El  $H_2$  permite la operación estable del motor con alta recirculación de gases de escape ( $EGR$ ) comparado con la gasolina debido también a los más amplios límites de inflamabilidad y mayor velocidad de propagación de la llama [46].

El efecto de la regulación cualitativa con el  $AFR$  y con el  $EGR$  se observa fácilmente en la Ecuación 2.18. La regulación con  $AFR$  está controlado por el parámetro  $\lambda$  y la regulación por  $EGR$  por el parámetro  $V_T$ , ya que introducir gases inertes en el cilindro, en esencia reduce el volumen total que ocupa la mezcla de aire y combustible.

Estas dos estrategias son ideales para operación a bajas cargas porque evitan las pérdidas de bombeo de la estrangulación. Sin embargo, para altas cargas, donde se requiere mucha potencia, están limitadas.

Una opción para incrementar la potencia es sobrealimentar o turbo-sobrealimentar el motor. Ambos consisten en incrementar la presión de admisión en el colector de

admisión, lo cual incrementa la densidad de referencia  $\rho_{ref}$  en la Ecuación 2.18. La sobrealimentación consiste en incorporar un compresor mecánico en la admisión, que obtiene potencia mecánica del propio motor (es una pérdida). La turbosobrealimentación consiste en colocar una turbina en el escape, la cual está conectada a un compresor en la admisión. El compresor obtiene potencia de la turbina que a su vez es alimentada por la energía de los gases de escape, por lo que este método aumenta no solo la potencia si no también el rendimiento. No obstante, en comparación con los combustibles convencionales, el  $H_2$  ofrece poca energía en sus gases de escape por lo que la implementación de la turbosobrealimentación es más compleja en un MEP de  $H_2$  [46].

Para regular correctamente la potencia a altas cargas no queda otra opción que incorporar una estrategia de regulación cuantitativa con mezcla estequiométrica, como los MEP convencionales. Afortunadamente, es posible tener lo mejor de ambos mundos. Idealmente, para solucionar el compromiso entre alto rendimiento y reducidas emisiones a bajas cargas (regulación cualitativa) y alta potencia específica a altas cargas (regulación cuantitativa) el motor debe combinar ambas estrategias de regulación de carga [21, 45, 20]. La zona crítica de emisiones de  $NO_x$  ( $1 < \lambda < 2$ ) debe evitarse y cuando se opere con mezcla estequiométrica debe aplicarse el post-tratamiento de reducción de  $NO_x$  típico de los MEP.

Para citar un ejemplo real, el *BMW Hydrogen 7* es el vehículo de hidrógeno con mayor unidades producidas hasta la fecha. El vehículo incorpora un *bi-fuel system* permitiendo la operación con gasolina o con hidrógeno. Cuando opera con  $H_2$ , el vehículo combina la regulación de la carga cualitativa a bajas y medias cargas y regulación cuantitativa estequiométrica para cargas altas. El depósito de  $H_2$  contiene 8 kilos en estado criogénico, ofreciendo un rango de 200 kilómetros operando con  $H_2$  [21].

### 3.7. Combustión anormal

Los MEP operados con hidrógeno tienen sus prestaciones limitadas por los fenómenos de combustión anormal. Estos son eventos indeseados en la combustión. Se producen por la baja energía de ignición, amplio límite de inflamabilidad y rápida velocidad de combustión del  $H_2$ . Estas propiedades, como se ha expuesto en apartados anteriores, pueden ser ventajosas para el motor, pero en este caso, pueden ser causantes de las limitaciones del motor. Se distinguen tres fenómenos de combustión anormal: la pre-ignición, el retroceso de la llama (*backfire*, también llamado *flashback*) y el *knock*.

#### **Backfire**

El fenómeno mayormente citado en la bibliografía es el *backfire*. Consiste en la pronta y descontrolada inflamación del  $H_2$  durante la carrera de admisión, ya sea en el colector de admisión o en la cámara de combustión. Se produce cuando hay puntos calientes (fuentes de calor) indeseados en la cámara como puede ser la bujía de ignición o gas residual caliente. El  $H_2$  fresco, al tener baja energía de ignición, puede inflamarse con solo estar en contacto con estos puntos calientes. El *backfire* es un gran problema sobretodo cuando ocurre en ciclo abierto (con las válvulas de admisión abiertas) ya que la llama se propagaría por el colector de admisión, aumentando muchísimo la presión y pudiendo dañar o incluso destruir el sistema de admisión.

Para evitar este fenómeno conviene optar por una estrategia de inyección directa en ciclo cerrado en lugar en PFI. De esta manera si el  $H_2$  se auto inflama prematuramente, la llama no se propagaría por el conducto de admisión. También hay que evitar los puntos calientes, por lo que puede ser necesario modificar la estructura del motor de hidrógeno con respecto al de gasolina. Otra opción es modificar el sistema de inyección para permitir una entrada intermitente de puro aire en el cilindro para refrigerar los potenciales puntos calientes, antes de aspirar la mezcla de aire e  $H_2$  [27].

### **Pre-ignición**

La pre-ignición, que no debe confundirse con el *backfire*, es la combustión pronta y descontrolada antes del salto de la chispa en la carrera de compresión (ciclo cerrado). Este fenómeno adelanta la combustión. Al estar las válvulas cerradas y la carga siendo comprimida, este fenómeno puede provocar un muy rápido incremento en las presión y daño al motor.

Las causas de la pre-ignición son en esencia las mismas que las del *backfire*. Para evitarlo hay que diseñar correctamente la bujía de encendido y permitir una etapa de ventilación/refrigeración para eliminar puntos calientes como se comentaba anteriormente. También hay que evitar lo más mínima la presencia de carga residual.

### **Knock**

El *knock* es la autoinflamación de la mezcla  $H_2$  - aire que se sitúa por delante del frente de llama durante la combustión. Es decir, la autoignición de la mezcla lejos del frente de llama. Esto genera grandes amplitudes de ondas de presión al liberarse de forma descontrolada la energía restante de la mezcla. Provoca daño en los componentes del motor, reduce las prestaciones, aumenta la transferencia de calor a las paredes y debido a las altas presiones y temperaturas alcanzadas aumentan también las emisiones.

Afortunadamente, el *knock* es menos probable que ocurra con  $H_2$  que con gasolina debido a la mayor temperatura de autoignición. A pesar de esto, sus efectos pueden ser más severos debido a la mayor de velocidad de combustión [46].

Para los tres fenómenos descritos, una estrategia efectiva para minimizar la probabilidad de que ocurran es operar con mezclas pobres. El exceso de aire tiene efecto refrigerante y consigue reducir las temperaturas tanto de combustión como de los componentes. El mismo efecto puede conseguirse aumentando el *EGR*, que además reduce los  $NO_X$ . Llevando está estrategia al extremo, se tiene la técnica de inyección de agua [23], que consigue diluir térmicamente la mezcla, absorbiendo calor. Por último, optar por un sistema de inyección directa en la carrera de compresión elimina totalmente la posibilidad de que ocurra el *backfire*.

---

# 4. Transición al hidrógeno

---

## 4.1. Introducción

En este capítulo se describen y estudian los que se han considerado los cuatro pilares fundamentales de la transición al hidrógeno: la producción, los mix energéticos, el análisis de las emisiones asociadas al ciclo del combustible y el correspondiente análisis económico. En la sección 4.2 se exponen los distintos métodos de producción y obtención del hidrógeno. La sección 4.3 expone la relevancia de las matrices energéticas. Seguidamente, en la 4.4 se estudian las emisiones asociadas al ciclo del hidrógeno, teniendo en cuenta las emisiones asociadas no solo a su combustión en el motor si no también a la producción y distribución del mismo. Por último, en la 4.5 se estudia la viabilidad económica de la transición al hidrógeno. Las cuatro secciones están estrechamente relacionadas con los métodos de producción, pero se han dividido con objeto de clarificar y ordenar.

## 4.2. Producción y obtención de hidrógeno

En la introducción del documento (Capítulo 1), se ha especificado que el objetivo del trabajo es promover la transición hacia la utilización del hidrógeno como combustible en la automoción. Pero para que esto se haga posible debe haber una infraestructura a gran escala de producción, distribución y almacenamiento del hidrógeno. De no ser así o de estar pobremente establecida, no se pueden hacer realidad los milagros del hidrógeno en la automoción, ni en ningún otro sector. Es mas probable que se haga realidad en el sector de la automoción si la producción está centralizada, disponible para diversidad de aplicaciones y sectores. En esta sección, se pretende definir los principales métodos de producción, distribución y almacenamiento de hidrógeno.

### 4.2.1. Contexto y motivación

La motivación para producir hidrógeno es clara. El hidrógeno es un portador de energía sostenible y puede usarse como combustible en sistemas de energía sostenibles debido a sus muy bajas e incluso potencialmente nulas emisiones finales. Ofrece un sinfín de producción con sistemas no renovables y renovables. Entre las muchas ventajas que ofrece el hidrógeno como portador de energía y como combustible están las siguientes [2]:

- Mejores rendimientos en los sistemas
- Producción a partir de agua con cero emisiones potenciales
- Disponibilidad de diferentes formas de almacenamiento
- Compatible con distintas distancias de distribución

- Fácil conversión a diversidad de formas de energía
- Mayor poder calorífico superior e inferior que casi todos los combustibles fósiles

Sin embargo, a pesar de las muchas ventajas del hidrógeno, los métodos de producción existentes no son comercialmente maduros y las eficiencias de los métodos de producción son bajas, lo que significa que la producción es cara [1].

Para que sacar el máximo partido a los beneficios del hidrógeno, la producción debe ser a partir de recursos que sean: renovables, limpios, abundantes, fiables y económicos. Tanto la energía como los materiales utilizados para la producción deben ser abundantes. Una de las clasificaciones más importantes de los métodos de producción es si viene de combustibles fósiles, a partir de *water splitting*, es decir, a partir del agua o de la biomasa.

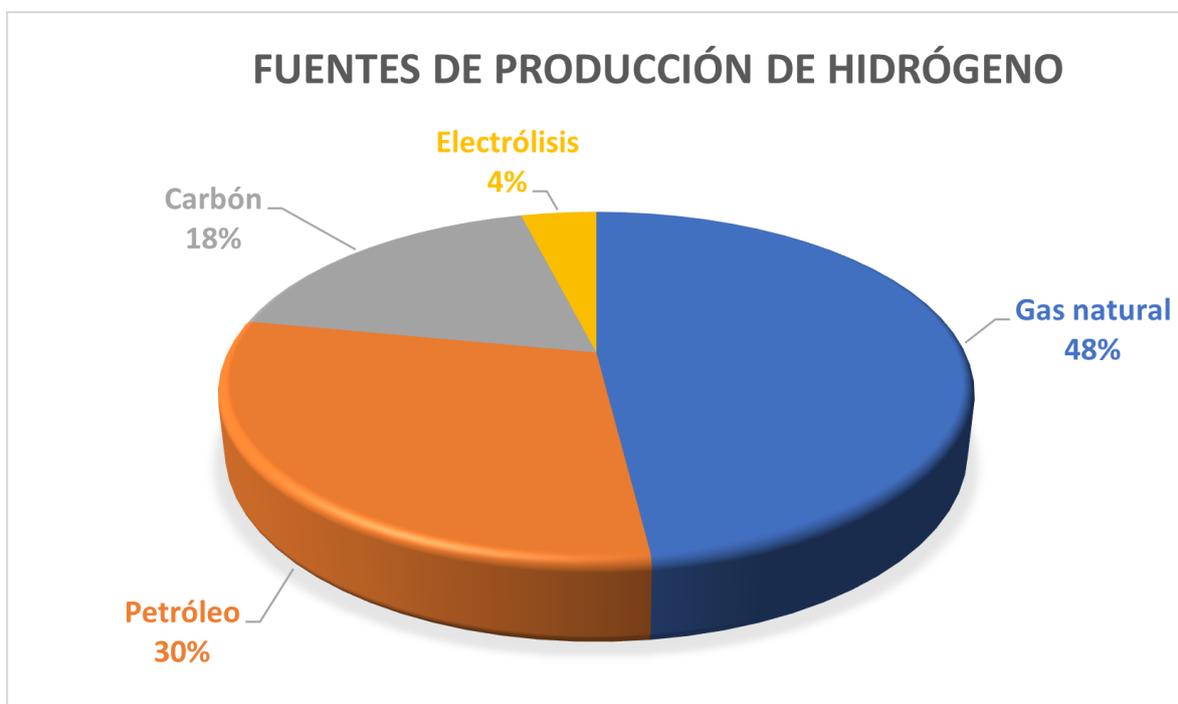


Figura 4.1: Fuentes de producción de hidrógeno [36].

En la Figura 4.1, se observa que actualmente la producción viene prácticamente toda a partir de combustibles fósiles: gas natural, petróleo y carbón. Esto se debe a que el hidrógeno por sí solo no existe de forma natural en el planeta, sino que está contenido en otros compuestos como los hidrocarburos (combustibles fósiles), el agua o la biomasa. Casi un 50% del hidrógeno viene del gas natural y solamente un 4% se atribuye al *water splitting* o división del agua. Una ínfima parte, alrededor de un 0.1% se atribuye a otras fuentes como la biomasa o la energía nuclear, que se presentan en esta sección. Esta figura lleva a pensar que actualmente la producción de hidrógeno no es amistosa con el medio ambiente, como se ve a continuación, ya que si viene de combustibles fósiles, inevitablemente tendrá asociadas emisiones de  $CO_2$  entre otras cosas. Por esto, es muy importante prestar atención a los métodos de producción de hidrógeno, ya que la clave de ralentizar las emisiones de GHG globales no solo está en producir hidrógeno para que sustituya a los combustibles fósiles, sino en controlar la

producción para que esta no sea causante propia de producir GHG.

Hoy en día la producción de hidrógeno verde (que produce mínimas o cero emisiones) es muy ineficiente y cara. Sin embargo, la literatura indica que es solo cuestión de tiempo para que los nuevos métodos de producción evolucionen a ser limpias, eficientes y más asequibles económicamente con la introducción de materiales y tecnologías avanzadas.

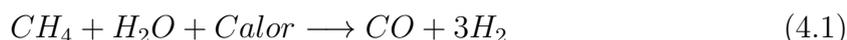
#### 4.2.2. Producción a partir de combustibles fósiles

La mayoría de los recursos fósiles pueden utilizarse para producir hidrógeno con diversidad de métodos y complejidades. Buscan separar el hidrógeno del carbón o del agua mediante reacciones químicas exotérmicas o endotérmicas. En todos los casos, el  $CO_2$  es un subproducto de la producción. Por lo tanto, para que la producción sea lo más limpia posible, el  $CO_2$  debe ser capturado y contenido.

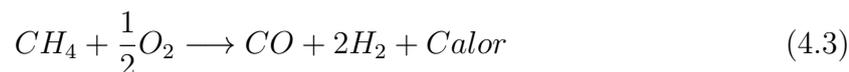
##### Producción a partir de gas natural

Existen tres métodos actualmente para realizar la producción a partir de gas natural: reformado de gas natural o *Steam Methane Reforming*(SMR), oxidación parcial (POX) y reformado autotérmico (ATR).

El SMR consiste en una reacción endotérmica entre metano (gas natural) y vapor de agua, que produce hidrógeno y monóxido de carbono (Ecuación 4.1). Afortunadamente, el  $CO$ , que ocupa un 12% del volumen del gas producido, reacciona con el  $H_2O$  para producir  $CO_2$  y más  $H_2$  via la que se conoce como la reacción *water gas shift* o desplazamiento del vapor de agua (Ecuación 4.2). [2]



En POX se realiza la combustión parcial del gas natural con oxígeno puro para producir  $CO$  y  $H_2$  (Ecuación 4.3). Esta es una reacción exotérmica que por tanto no necesita una fuente de calor. El  $CO$  después se convierte en  $H_2$  y  $CO_2$  con la reacción *water gas shift* (Ecuación 4.2). [2]



ATR es una combinación de SMR y POX y la Ecuación 4.2 vuelve a utilizarse para convertir el  $CO$ .

## Producción a partir carbón

La producción de hidrógeno a partir de carbón se realiza mediante procesos de gasificación de carbón (CG). Estos procesos se benefician de las altas temperaturas ya que facilitan la conversión de carbón en gas. Un ejemplo de un proceso de gasificación de carbón es el de la Ecuación 4.4. La reacción es endotérmica y necesita una fuente de calor como en SMR. [2]



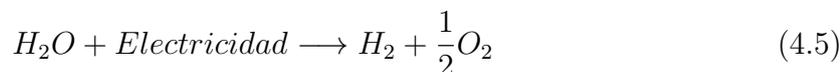
Una vez más, la reacción de desplazamiento del vapor de agua (Ecuación 4.2) se aplica para convertir el  $CO$  en  $H_2$  y  $CO_2$ . La gasificación de carbón como método de producción de  $H_2$  esta desarrollada comercialmente pero es más compleja y consecuentemente también es mas costosa que la producción a partir de gas natural, por eso queda en tercer lugar en la Figura 4.1. Por otro lado, el carbón es una recurso abundante en la mayoría de zonas del planeta; va a seguir utilizándose para producir  $H_2$  así como el resto de combustibles fósiles por ahora, así que conviene destinar recursos en la innovación de los métodos para que sean lo más limpios posible. [2]

Otro método de producción de  $H_2$  es la pirólisis. La pirólisis es una degradación térmica de una sustancia en ausencia de oxígeno, por lo que dichas sustancias se descomponen mediante calor, sin que se produzcan las reacciones de combustión.

### 4.2.3. Producción a partir de agua

El agua contiene moléculas de dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno ( $H_2O$ ). El objetivo de los procesos de *water splitting* es disociar las moléculas de agua para obtener el  $H_2$ . Los procesos de división del agua se pueden clasificar en cuatro: electrólisis de agua, fotoelectrólisis, biofotólisis, descomposición a altas temperaturas y división del agua termo-química. [2]

En la electrólisis de agua se consigue separar el hidrógeno del oxígeno mediante la aplicación de energía eléctrica, tal y como describe la Ecuación 4.5.



### 4.2.4. Producción a partir de biomasa

En procesos de conversión de biomasa, se produce un gas que contiene hidrógeno. Los métodos actuales incluyen la gasificación, pirólisis e hidrólisis (similar a la división de agua) pero la más popular es la gasificación. A pesar de que la gasificación sea un proceso muy maduro, actualmente no existen plantas comerciales de producción de hidrógeno a partir de biomasa aunque se considera que la gasificación y la pirólisis son los medios más prometedores para la comercialización de este tipo de producción de hidrógeno. Destinar recursos a la producción de hidrógeno a partir de biomasa

es esencial para descarbonizar la producción ya que la biomasa es el sustituto más probable del petróleo en la generación de hidrógeno y como se vió en la Figura 4.1, el petróleo es la segunda fuente más grande.

#### **4.2.5. Métodos de distribución**

Los métodos actuales de distribución de hidrógeno a las estaciones de repostaje son tres.

##### **Camiones de hidrógeno gaseoso comprimido**

Es la tecnología actual. El transporte puede hacerse no solo por trailer si no también por barco o tren. Es indispensable que el hidrógeno este comprimido, para que su densidad se mayor y el transporte sea mas eficiente. La compresión es costosa y normalmente este método se realiza para distancia de 200 millas o menos [6].

##### **Tanques de hidrógeno criogénico**

Como es de esperar, este método es más costoso que el de hidrógeno gaseoso comprimido, pero debido a que la densidad del hidrógeno en este estado es mayor, su transporte es más eficiente y puede hacerse a distancias mayores. Al transportar mas hidrógeno por cada camión (por ejemplo) en comparación con los trailer de hidrógeno gaseoso, esto implica que se necesitan menos camiones, entregas, trabajadores, mantenimiento y se generan menos emisiones, aunque estos análisis se realizan mas detalladamente en las secciones posteriores del capítulo. El hidrógeno criogénico, pasado un tiempo se evapora de sus recipientes y por esta razón, es muy importante que el ritmo de consumo en las estaciones sea por lo menos similar al ritmo de distribución.

##### **Red de tuberías**

Contar con una infraestructura de red de tuberías para distribuir el hidrógeno la opción más económica. Hoy en día en Estados Unidos, está limitado a 1600 millas [6]. Una gran ventaja es que existe la posibilidad de usar las redes de tubería existentes y doparlas de gas natural con hidrógeno. Una gran desventaja es que este método de distribución carece completamente de flexibilidad. Al contrario que la distribución por camiones, las redes de tuberías no pueden adaptarse cambios imprevistos en las rutas de distribución diarias.

##### **Producción en las propias estaciones de repostaje**

No es un método de producción explícitamente, pero significa que no haría falta transportar el hidrógeno a las estaciones ya que es producido directamente en estas.

### 4.3. Mix energéticos

La matriz energética, mezcla energética o mix energético es la combinación de fuentes de energía primaria que se utiliza en una zona geográfica. En un primer análisis, se ha visto que los métodos de producción de  $H_2$  a partir de combustibles fósiles producen inevitablemente  $CO_2$  y otros contaminantes. Además, estos combustibles tienen fecha de caducidad. De los métodos vistos, la electrólisis de agua no produce GHG ni contaminantes y además el recurso utilizado es el agua, por lo que abundancia no falta. Este método, a priori, no depende de combustibles fósiles. El problema aparece con la electricidad necesaria para la electrólisis, más concretamente, con cómo se produce dicha electricidad. Si esta se genera a partir de combustibles fósiles, la propia generación de la electricidad contribuye a la emisiones de GHG y contaminantes, a pesar de que en la producción de  $H_2$  por electrólisis de agua no se produzca ninguna de estas cosas. Si se da esta situación, entonces realmente la producción por electrólisis sí que generaría emisiones. El mix energético indica con que tipo de energía es posible producir esta electricidad. Por tanto, influye directamente con las emisiones y con el coste. Para que la electrólisis de agua tenga realmente cero emisiones asociadas, se busca que la electricidad se produzca a partir de energía renovables, es decir, que la proporción de estas en el mix energético sea alta.

Un factor importante que influencia el cambio en los mix energéticos es la demanda de energía, es decir, que clase de energía está buscando el consumidor. En la Figura 4.2, se observa que hasta 2015, la demanda de energía era mayoritariamente de combustibles fósiles, el que más el carbón, y las energías de bajo carbono se encuentran en último puesto. Contrariamente, la previsión para 2040 es que las energías de bajo carbono sean las más demandadas. Esto se debe principalmente a la creciente preocupación y concienciación sobre el medio ambiente. La presión social y gubernamental obliga a la productoras de electricidad a buscar medios de producción más sostenibles (renovables).

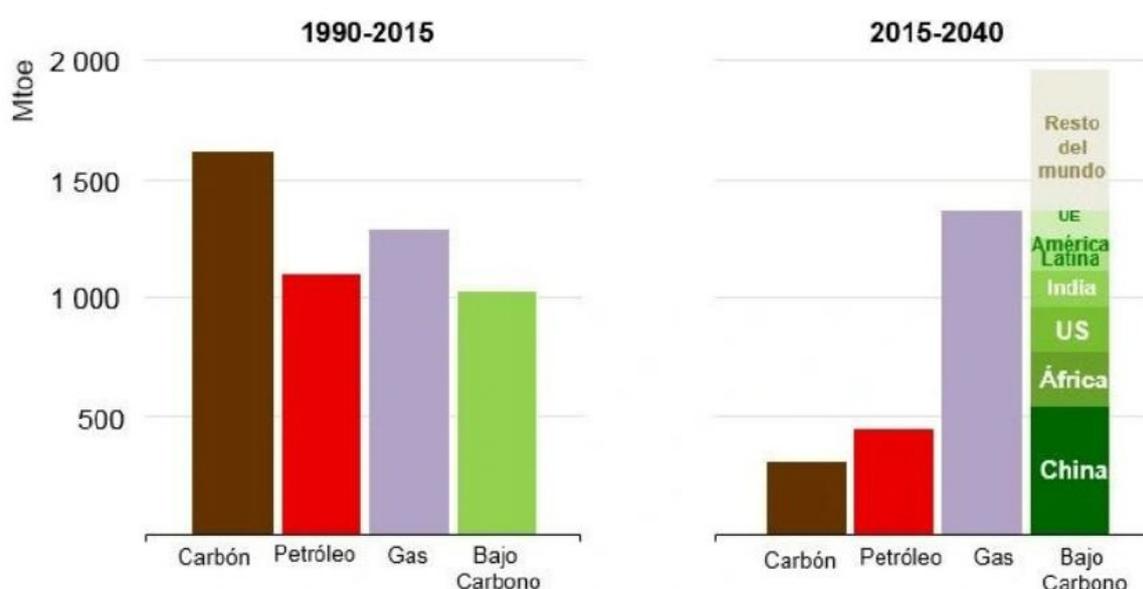


Figura 4.2: Demanda de energía mundial [30]

En la Figura 4.3 se muestra el mix energético en Europa en 2017 y la previsión para 2050. Queda claro que actualmente el dominio de la producción eléctrica viene de las energías fósiles, ya que son las que más proporción ocupan en la gráfica de 2017. Sin embargo, la previsión para 2050 indica un incremento sustancial en la proporción de las energías renovables. La misma tendencia se observa en la Figura 4.4, en la que se representa la evolución de las fuentes de generación de electricidad en los Estados Unidos. La proporción de energías renovables crecerá de un 21 % hasta un 42 % en 2050.

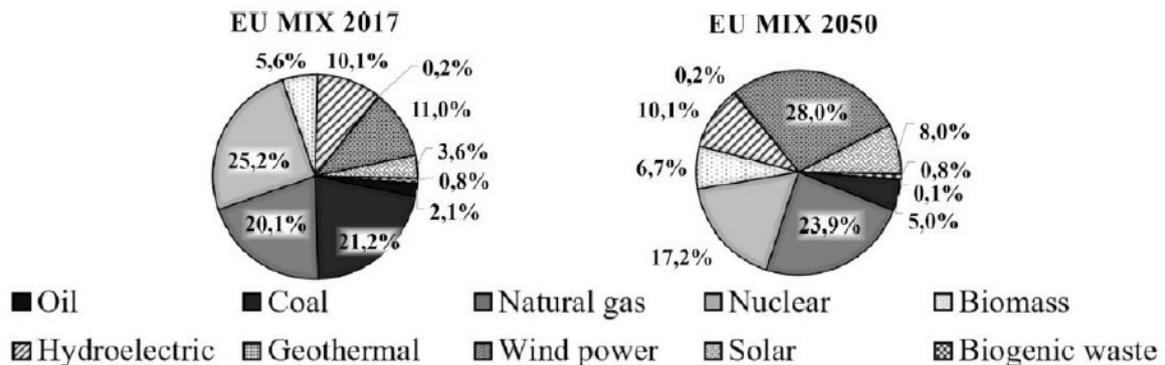


Figura 4.3: Mix energético en Europa en 2017 [14] y 2050 [24].

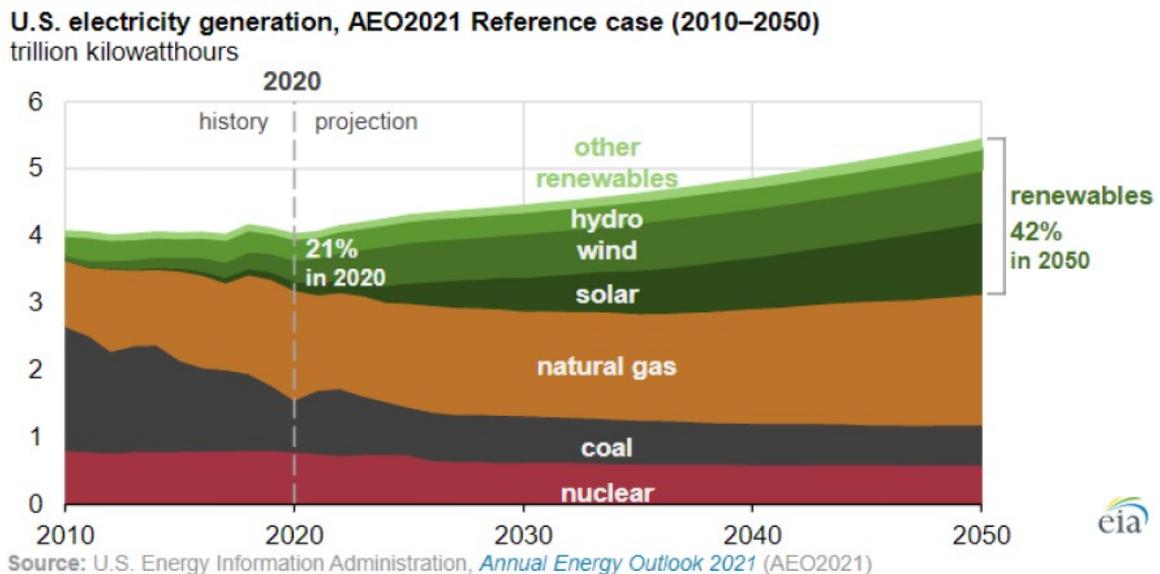


Figura 4.4: Fuente de generación de electricidad en los Estados Unidos desde 2010 hasta 2050 [3].

## Impacto de la guerra en Ucrania

Todas estas previsiones son obtenidas de bibliografía escrita antes de producirse el comienzo de la guerra en Ucrania. Ante la gravedad de la crisis energética promovida por la guerra, se ha decidido hacer un breve análisis de la situación para tener este factor en cuenta y entender como afecta en el contexto del presente trabajo.

En primer lugar, la guerra en Ucrania ha obligado a Europa y Estados Unidos entre otros, a imponer sanciones económicas a Rusia. Rusia exporta, según Reuters, 6,6 miles de millones de metros cúbicos diarios de gas, aproximadamente el 43% del gas del mercado mundial. Un 72% de esas exportaciones se venden a las principales potencias europeas [40]. Como consecuencia de las sanciones, Rusia ha contra atacado cortando el suministro de gas a aquellos que le han impuesto sanciones, como Europa.

La consecuencias del corte de gas son colosales, tanto por la subida de precios como por la posible falta de suministro de energía. Debido a las cifras de exportación del gas ruso mencionadas, muchos países dependen en menor o mayor medida de Rusia. Así pues, **la transición energética hacia energías renovables ya no es solo una cuestión climática, si no también una cuestión de dependencia.** Los combustibles fósiles no pueden producirse, solo extraerse de la zona geográfica donde se encuentren. Contrariamente, cualquier región tiene luz solar, viento, presas (en mayor o menor medida) de donde auto-producir energía renovable, sin depender de importaciones de energía fósil.

En conclusión, la guerra ha resaltado la necesidad de independizar la producción de energía de los combustibles fósiles y como consecuencia, sirve como acelerador de la transición energética. Esto significa que, las previsiones futuras de los mix energéticos teniendo en cuenta la guerra en Ucrania tendrán mayor proporción de renovables y energías limpias, por lo que la producción de hidrógeno por electrólisis tenderá a ser aun más libre de emisiones.

Además, con la transición a las renovables, en muchas regiones, durante cierta parte del año habrá sobre producción de energía (mayor producción que demanda). Esta energía sobrante, si no se almacena, podría desperdiciarse. Un método de almacenamiento inteligente sería en forma de hidrógeno. La electricidad sobrante podría utilizarse para producir hidrógeno mediante electrólisis y el hidrógeno producido serviría de portador y almacenamiento de esta energía. El hidrógeno producido en esta situación, podría utilizarse para alimentar a la red en las épocas del año en las que se diera la situación contraria (alta demanda y escasez de producción). Estas conclusiones promueven la producción de hidrógeno mediante electrólisis tanto para uso directo como para portar energía.

## 4.4. Análisis de las emisiones del ciclo del hidrógeno

En esta sección se pretenden estudiar las emisiones GHG que se producen en todo el ciclo del hidrógeno. El ciclo se ha dividido en tres: producción, distribución y consumo del combustible. **El nombre *fuel cycle* hará referencia a estos tres procesos.** Este estudio no es un *Life cycle analysis* propiamente ya que en este también deberían tenerse en cuenta las emisiones asociadas a la producción, montaje y desecho o reciclaje del propio vehículo. En este trabajo se han pasado por alto estas emisiones ya que son escasamente diferentes a las de los vehículos convencionales, a excepción de las emisiones relacionadas con los tanques de almacenamiento.

### 4.4.1. Emisiones de la producción de hidrógeno

En este apartado se pretende hacer un análisis de las emisiones generadas en la producción del hidrógeno a partir de la bibliografía.

#### Factores a tener en cuenta

Algunos de los factores a tener en cuenta se describen en este apartado. En primer lugar, hay que tener en cuenta que el tipo de producción no es enteramente representativo de las emisiones de la producción. Como ya se ha expuesto en la sección de Mix energéticos 4.3, el proceso de electrólisis a priori no produce emisiones, pero si las produce dependiendo de la energía utilizada para generar la electricidad. Por ello, hay que diferenciar las emisiones asociadas al método de producción y a la obtención de energía para dicha producción, donde hay que tener en cuenta los mix energéticos. Además, los Mix energéticos no solo dependen de la zona geográfica si no también de del año de estudio; la proporción de energías renovables en el mix energético será considerablemente mayor en el futuro.

Si la electricidad para electrólisis viene de energías renovables, no es lo mismo en términos de emisiones (ni de coste) que provenga de paneles solares fotovoltaicos (PV), energía eólica o energía hidroeléctrica, por ejemplo.

La producción de hidrógeno por SMR o CG puede hacerse con captura y almacenaje de  $CO_2$  (CCS). Este es un sistema de reducción de emisiones de  $CO_2$  aplicado a sistemas de generación de energía mediante combustibles fósiles (eléctrica o para generar hidrógeno como es el caso). Es un sistema que hoy en día esta relativamente poco implementado pero que según el plan de IEA en 2012, los sistemas CCS contribuyen alrededor de un 14% en la reducción de emisiones necesaria para 2050 [29].

El hidrógeno producido puede almacenarse como gas comprimido o líquido criogénico. Ambas implican un gasto adicional de energía para comprimir o enfriar pero el impacto que tienen en términos de emisiones es diferente.

Estos factores se resumen en la siguiente lista:

- Combustibles fósiles o electrólisis

- Con o sin CCS
- Mix energéticos actual o previsión
- Electricidad a partir de la red eléctrica o de energías renovables
- Tipo de energías renovables
- Hidrógeno gaseoso o líquido criogénico

Con estos factores en cuenta, en los siguientes apartados se analizan los resultados de algunos de los estudios encontrados en la bibliografía. Estos estudios son principalmente estudios LCA (*Life cycle assesment*) en los que se investiga y evalúa los impactos ambientales durante toda la vida de un determinado producto, desde la extracción de los recursos materiales hasta la disposición o reutilización/reciclaje.

### Influencia de la procedencia de la electricidad

En este apartado se pretende resaltar la diferencia entre las emisiones generadas de la producción de hidrógeno mediante electrólisis, dependiendo de si la electricidad proviene de la red eléctrica o se ha producido específicamente a partir una clase de energía renovable. Bhandari et al. [9] recopilaron 21 estudios LCA de producción de  $H_2$  con distintas tecnologías. Se concluyó que la electrólisis con electricidad generada con energía eólica o hidroeléctrica es una de las mejores tecnologías de producción de  $H_2$ . En la Figura 4.5, se muestra el impacto en términos de GHG medido en  $kgCO_{2eq}/kgH_2$ , denominado como GWP (*Global Warming Potential*). Se observa claramente la gran superioridad de todas las ER frente a la electricidad de la red, debido a la alta proporción de combustibles fósiles en el mix energético.

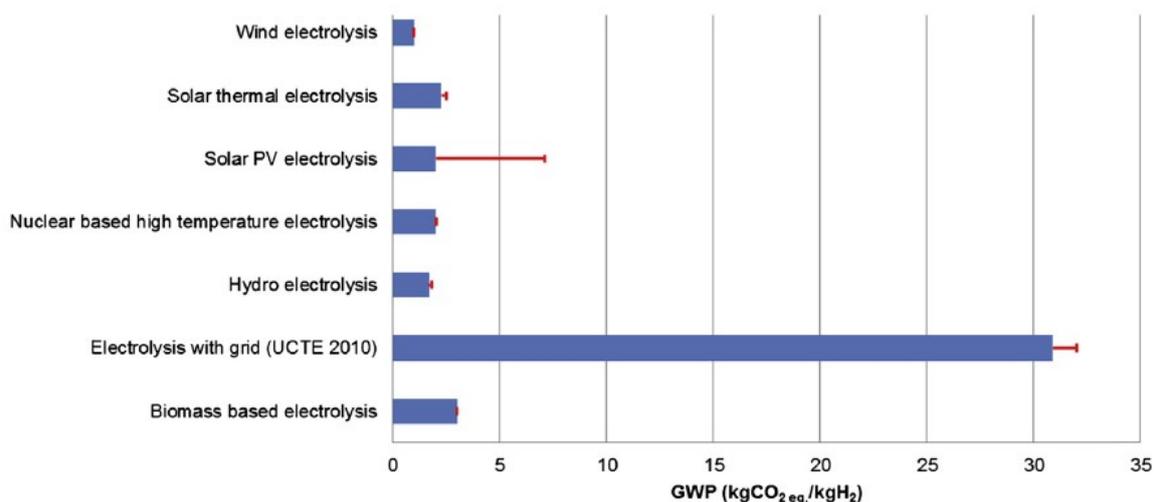


Figura 4.5: GWP de distintas tecnologías de electrólisis [9].

Adicionalmente, es interesante conocer de donde provienen las emisiones de por ejemplo, la electrólisis a partir de energía eólica. Bhandari et al. [9] obtuvo que un 78 % proviene de la producción y operación de la turbina, 18 % de la compresión y el almacenamiento del  $H_2$  y un 4 % producción y operación del electrolizador.

## Combustibles fósiles sin CCS frente a ER

Si se está teniendo en cuenta la producción a partir de combustibles fósiles sin CCS frente a ER (Energías renovables), es intuitivo pensar que la primera tendrá un impacto mas inclemente sobre el medio ambiente. Koroneos et al. [31] realizaron un estudio LCA del impacto ambiental de los métodos de producción de hidrógeno. Consideraron producción por SMR y producción a partir de varias ER (solar fotovoltaica, solar térmica, eólica, hidroeléctrica y biomasa). Concluyeron que la producción a partir de energía eólica, hidroeléctrica y solar eran las mejores. Los resultados de  $CO_2$  equivalente por  $MJ$  de  $H_2$  producido se muestran en la Figura 4.6. Se observa que en comparación con las renovables, el SMR es muy perjudicial para el medio ambiente y por detrás las placas solares fotovoltaicas.

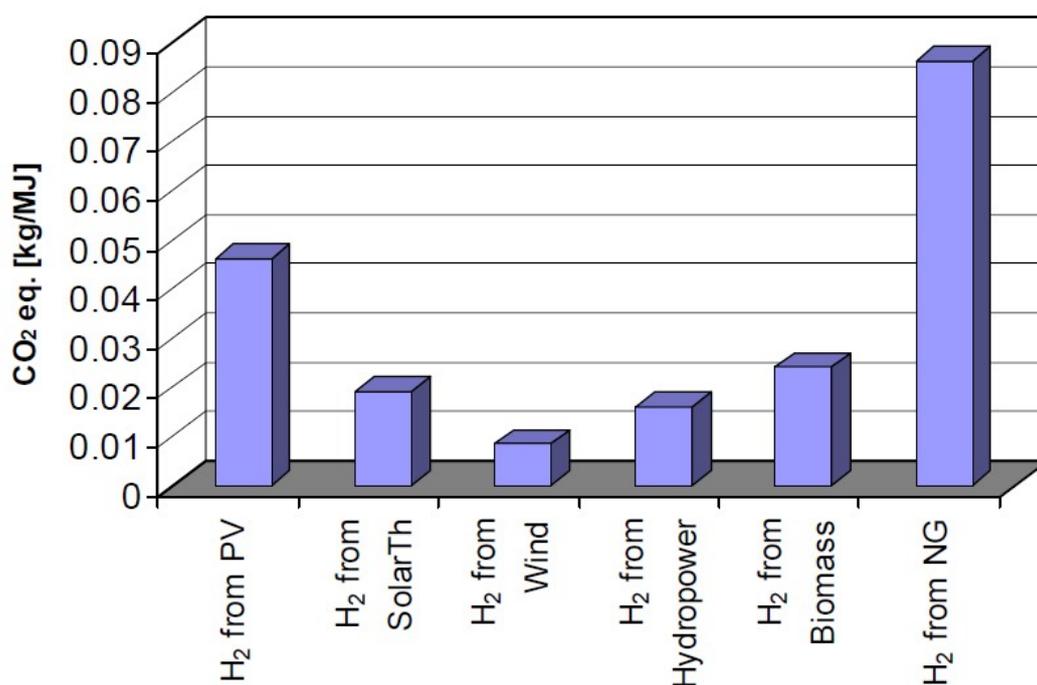


Figura 4.6: Emisiones de  $CO_2$  equivalente para distintos métodos de producción de  $H_2$  [31].

Cetinkaya et al. [13] realizaron un estudio LCA para 5 métodos de producción de  $H_2$ : SMR, CG, electrólisis de agua via energía eólica, fotoelectrólisis y división de agua termo-química. En términos de emisiones de  $CO_2$  equivalente, se obtuvo que la división de agua termo-química es la superior sobre los otros métodos, seguido de electrólisis de agua vía energía eólica y fotoelectrólisis. Los resultados en cuestión se muestran en la Figura 4.7.

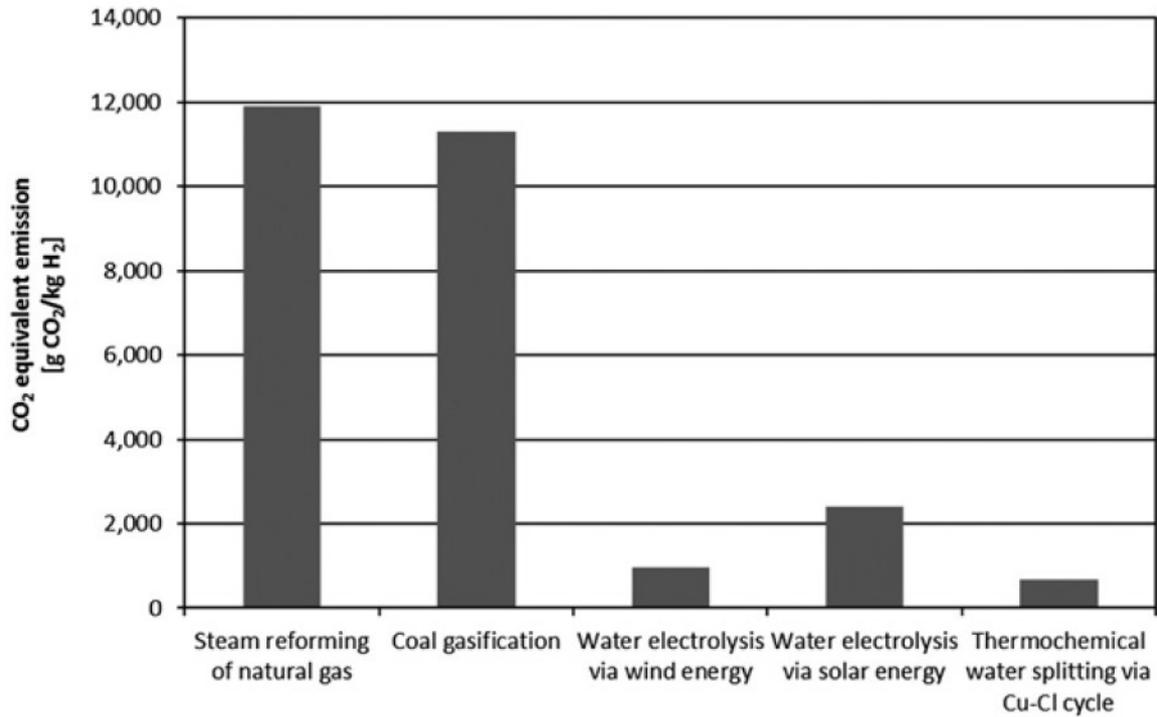


Figura 4.7: Emisiones de  $CO_2$  equivalente para distintos métodos de producción de  $H_2$  [13].

Una vez más se comprueba que la producción a partir de combustibles fósiles no es rival contra las renovables en términos de reducción de emisiones. Además, vuelve a obtenerse la electrólisis vía energía eólica como una de las mejores alternativas.

### Impacto de la incorporación de los sistemas CCS

Hasta ahora se han presentado resultados de estudios en los que se evalúa SMR o CG pero sin CCS. La incorporación del sistema CCS debería reducir sustancialmente las emisiones hasta posiblemente competir con otros métodos no fósiles. Bhandari et al. [9] también estudio las emisiones de SMR y CG con y sin CCS entre otros y las comparó con las estudiadas en la Figura 4.5. Los resultados con todos los métodos comparados se muestran en la Figura 4.8. En ella se observa que para el estudio, la producción por electrólisis con electricidad de la red continua siendo la que más emisiones emite incluso por detrás de SMR y CG sin CCS, las cuales se encuentran en el segundo lugar de las más perjudiciales. También se observa la notable reducción en emisiones cuando se incorpora el sistema CCS en SMR y CG, generando apenas un poco más que las renovables. Aplicado a las condiciones de este estudio, la CG con CCS compite perfectamente con las renovables.

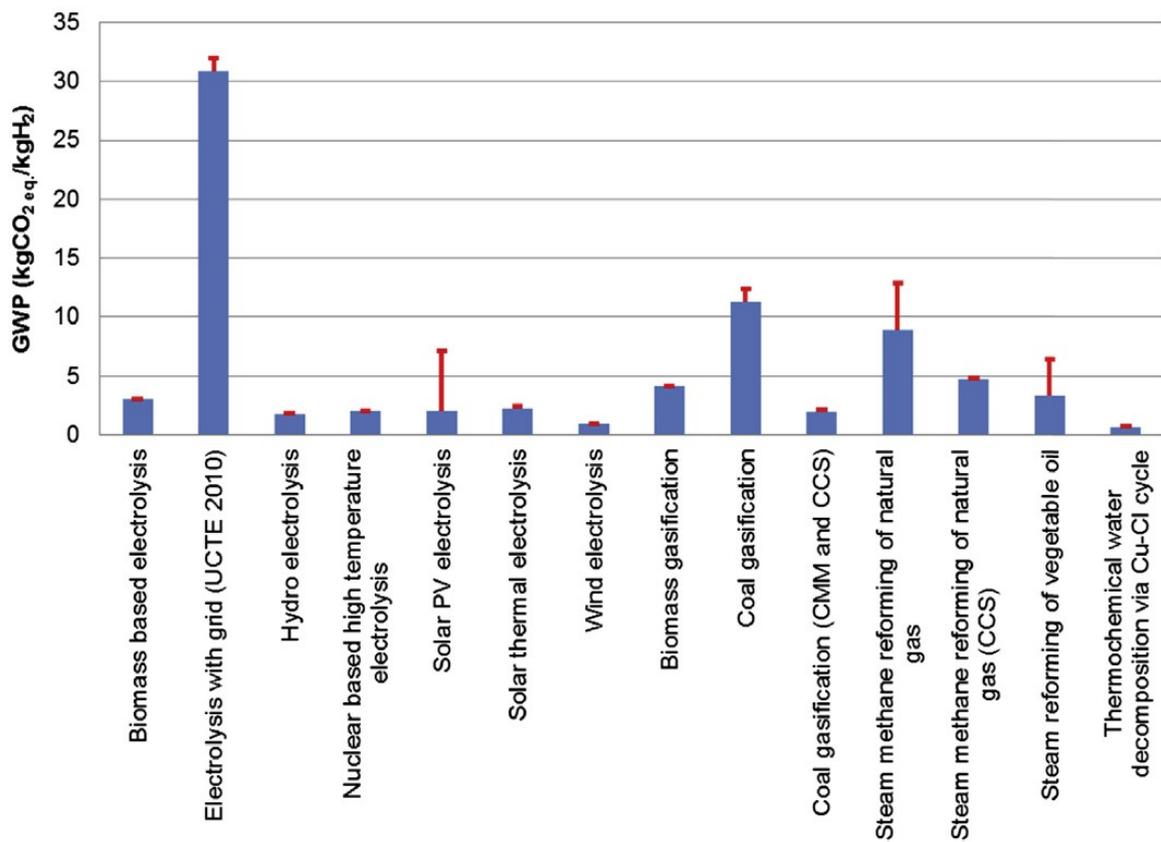


Figura 4.8: GWP de distintas tecnologías de producción de  $H_2$  [9].

## Evolución temporal

Se ha observado que las emisiones a partir de electrólisis con electricidad de la red es la ruta de producción que más emite. Sin embargo, esta observación se ha hecho para el año en el que el estudio se ha hecho. De cara al futuro, ya que los mix energéticos tendrán mayor proporción de ER, la electricidad de la red generará menos emisiones. Desantes et al. [16] realizaron un simplificado estudio LCA que compara emisiones GHG y  $NO_x$  para tecnologías de  $H_2$ , eléctricas y convencionales para el sector automovilístico en Europa. Se consideró el mix energético actual y el previsto para 2050 en Europa que fue mostrado en la Figura 4.3. Se concluyó que la mejor estrategia de producción de  $H_2$  en términos de reducción de emisiones GHG es SMR con CCS y SMR sin CCS para  $NO_x$ . En la Figura 4.9 se compara SMR con y sin CCS con electrólisis de la red para 2017 y 2050 y con distintos métodos de distribución y estado del hidrógeno. GH2 representa  $H_2$  gaseoso y LH2 representa  $H_2$  líquido criogénico. Se observa por una parte, que las emisiones mediante electrólisis de la red son altamente dependientes de los mix energéticos, ya que en 2050 estas se reducen considerablemente. Por otra parte, la gráfica muestra que actualmente es mejor producir  $H_2$  por SMR que por electrólisis de la red, al igual que se ha visto en los otros estudios. Solamente para 2050, esta sera mejor que SMR sin CCS pero ni si quiera entonces superará a SMR con CCS. Otra importante observación es que al contrario que la electrólisis, el SMR depende muy poco de los mix energéticos debido a que solo una pequeña parte de la energía utilizada es eléctrica. Por último, se tiene que producir LH2 emite mas que producir GH2, debido a que se requiere mayor energía para la criogenización que solo para la compresión.

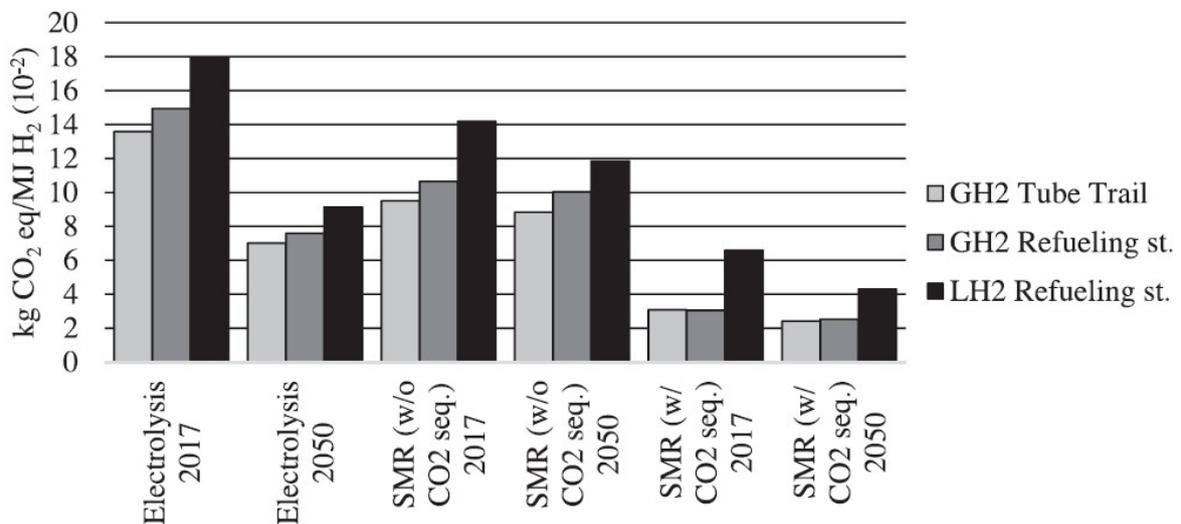


Figura 4.9: Emisiones GHG para  $H_2$  gaseoso o líquido, distintas rutas de producción y distribución y año de estudio [16].

Visualizar una producción en masa a partir de electrólisis con ER implicaría tener acceso a ER en cada electrolizador, lo cual no es realista. Una ruta mas probable para la producción en masa de  $H_2$  es descarbonizar los mix energéticos y realizar la producción con electrólisis con electricidad de la red más limpia [16]. Por esto, este último estudio es más representativo que los demás, ya que considera electrólisis de la red y no ER

por si solas.

## Comparación con otros combustibles

Desantes et al. [16] también compararon las emisiones de la producción de combustible de  $H_2$  con otros combustibles alternativos y convencionales como diésel, gasolina o electricidad. Los resultados indican que la producción de diésel, gasolina y CNG (*Compressed Natural Gas* o gas natural comprimido) es responsable de menos emisiones (tanto GHG como  $NO_x$ ) que la producción de  $H_2$  mediante cualquier ruta de producción y distribución, para 2017 y para 2050. Esto, a priori, es una desventaja del  $H_2$  frente a los combustibles convencionales. No obstante, debido a que la operación del vehículo de  $H_2$  no produce  $CO_2$ , compensa las emisiones de producción como se observa a continuación en la Figura 4.12.

Cabe destacar que en este estudio, el efecto de la mejora en la eficiencia de los procesos de SMR o electrólisis no se ha considerado. Este efecto haría que las emisiones en 2050 de estas fueran menores.

### 4.4.2. Emisiones de la distribución de hidrógeno

Los 4 rutas presentadas en la el apartado 4.2.5 tienen sus implicaciones en cuanto a las emisiones generadas.

En el estudio de Desantes et al. [16], se consideró en transporte en trailer de GH2 desde una planta central y también la producción en las estaciones de repostaje de GH2 o LH2. Sin embargo, no se tuvo en cuenta la opción de transporte por red de tuberías. Esto es lógico ya que la implementación de este sistema para el transporte de hidrógeno no es una solución ni a corto ni a medio plazo y menos si se esta considerando toda Europa. Una posible solución es utilizar la red de tuberías de gas natural que existe actualmente. El problema es que no están preparadas para contener un gas tan difusivo como lo es el hidrógeno.

En la Figura 4.9 se observa que la producción en las estaciones de repostaje genera la mayor cantidad de emisiones en todos los casos. En un principio, esto es contra intuitivo ya que con esta estrategia se evita el transporte de hidrógeno. Las emisiones aparecen porque de esta forma se necesita mayor consumo de agua que la producción en planta central debido a economías de escala. Como el agua tiene que ser tratada previamente, se utiliza más energía y recursos, resultando en más emisiones [32].

Entre transportar GH2 o LH2, a pesar de que LH2 ofrezca mayor densidad de  $H_2$  transportado. El proceso de licuefacción requiere un consumo de energía considerablemente mayor al de solo compresión (30 % del PCS del  $H_2$ ), lo que se traduce es más emisiones generadas en comparación con la producción de GH2.

Hay otros factores a tener en cuenta para determinar cual es la estrategia más apropiada: la distancia a transportar, el volumen y ambas se relacionan con el coste, que se verá en la sección 4.5.

### 4.4.3. Emisiones de la operación del vehículo

Como ya se ha comentado en el Capítulo 3, en un motor de combustión de hidrógeno las únicas emisiones importantes son los  $NO_x$ . Las emisiones de carbón se limitan a pequeñas trazas de  $CO_2$ ,  $CO$  y UHC que se deben a la quema de combustible lubricante y pueden despreciarse.

También en el Capítulo 3 se han expuesto las ventajas de los MEP de hidrógeno en términos de  $NO_x$  en comparación con los de gasolina, debido a la posibilidad de operar con mezclas muy pobres de forma estable. Además, se han citado ejemplos de reducción de  $NO_x$  con hidrógeno como combustible.

#### Consumo de combustible

Aparte de los  $NO_x$ , la operación del vehículo tiene otra influencia sobre las emisiones. Esto se debe a que **el consumo de combustible influye indirectamente en las emisiones generadas en la producción y distribución del mismo, ya que cuanto mayor es el consumo, mayor se ha de producir y distribuir por unidad de distancia recorrida del vehículo, y en consecuencia, más emisiones se generan en estos procesos.** Por este motivo, es interesante ver los consumos de los vehículos de hidrógeno y compararlos con aquellos de gasolina.

Para visualizar los consumos, se han seleccionado una serie de vehículos reales de la literatura. Dichos vehículos han operado con gasolina y se adaptaron para operar con  $H_2$  o son capaces de operar con ambos combustibles, por lo que son muy útiles para realizar comparaciones. Sáinz et al. [44] realizaron modificaciones en un Volkswagen Polo 1.4 para convertirlo en un vehículo *bi-fuel* (que puede operar con hidrógeno o con gasolina). El consumo de hidrógeno fue para una velocidad media de 90 km/h. Dennis et al. [15] modificaron un Ford 4.0L I6 para operar con hidrógeno. El consumo se obtuvo siguiendo el test NEDC (*New European Driving Cycle*), que consiste en cuatro ciclos de conducción ECE-15 repetidos y un ciclo de conducción extra-urbano. Es una prueba diseñada para evaluar objetivamente el impacto medioambiental de los automóviles. Por último, Enke et al. [21] estudiaron el BMW Hydrogen 7 que puede operar con ambos gasolina e  $H_2$  y ya se citó en la sección 3.6 del Capítulo 3. No se especifica como se obtiene el consumo medio.

Las características de estos vehículos seleccionados se resumen en la Tabla 4.1.

Modelo	Cilindrada [c.c]	Referencias
Volkswagen Polo 1.4	1400	Sáinz et al. [44]
Ford 4.0L I6	3984	Dennis et al. [15]
BMW Hydrogen 7	5972	Enke et al. [21]

Cuadro 4.1: Vehículos seleccionados para diferentes análisis de consumos, emisiones y costes.

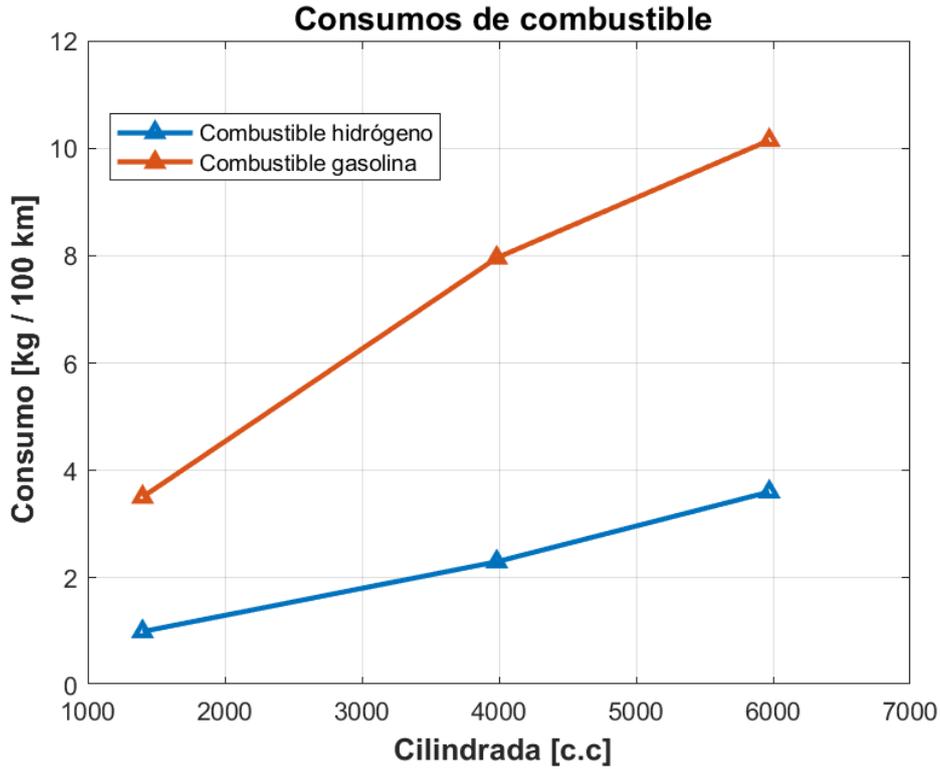


Figura 4.10: Consumos de hidrógeno o gasolina para los vehículos de la Tabla 4.1

En la Figura 4.10 se recopilan los consumos de los tres vehículos operando con hidrógeno y el consumo equivalente operando con gasolina en función de la cilindrada del motor. Claramente se observa que operando con hidrógeno en lugar de gasolina, el vehículo ofrece un consumo de combustible muy inferior de hasta más de 6 kilos en el caso del BMW *Hydrogen 7* debido a la mejor eficiencia de los motores de hidrógeno expuesta en la sección 3.4.2 del Capítulo 3.

Los datos de consumo de los vehículos se utilizan para otros resultados en esta misma sección y también en la sección 4.5.4.

### Consumo de energía

También es interesante visualizar el consumo de energía, ya que ambos combustibles tienen *PCI* diferentes. En la Figura 4.11, se representa el consumo de energía de los tres vehículos por cada 100 *km* de conducción. A los valores de la figura se ha llegado simplemente multiplicando los consumo de la Figura 4.10 por el *PCI* del  $H_2$  y la gasolina respectivamente, que se han definido en la Tabla 3.1. Se observa como a pesar del mayor *PCI* del  $H_2$ , debido al mayor rendimiento de los motores de  $H_2$ , el consumo de energía de los vehículos con  $H_2$  es también menor al de los de gasolina, aunque la diferencia es inferior comparada con el consumo en *kg*.

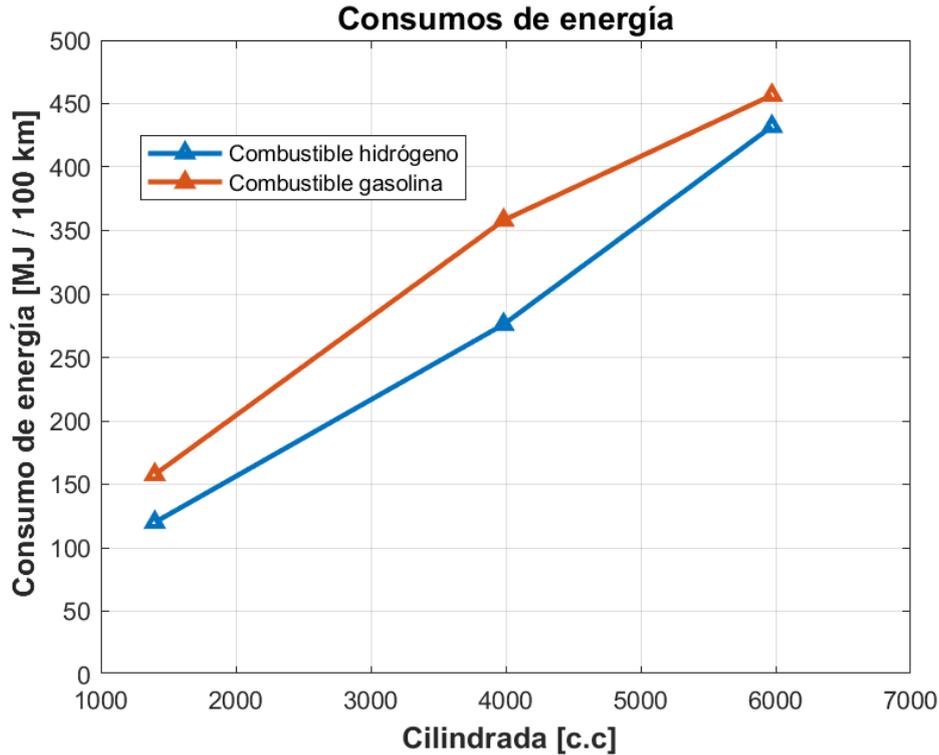


Figura 4.11: Consumos de energía de los vehículos de la Tabla 4.1 operando con hidrógeno o gasolina.

### Emisiones de $CO_2$ asociadas a la producción, distribución y consumo de combustible

Para visualizar realmente las emisiones, se van a considerar las emisiones de  $CO_2$  teniendo en cuenta la producción, distribución y el consumo de combustible. Para la producción y distribución, se van a considerar los datos del estudio LCA de Desantes et al. [16]. Concretamente, los resultados del que se llama ciclo de combustible (*fuel cycle*) en el estudio, el cual tiene en cuenta todos los procesos desde la extracción de los recursos materiales hasta la distribución del combustible a las estaciones. Para el caso de la gasolina es sencillo, ya que se da un solo resultado para 2017 y 2050 que resulta ser el mismo porque no varía prácticamente nada:  $0.022 \text{ kgCO}_{2eq}/MJ$  de gasolina.

Para el caso del  $H_2$ , se ha de seleccionar los métodos de producción y distribución de la Figura 4.9 que se desean analizar. La selección del método se va a hacer manteniendo un compromiso entre reducir las emisiones y hacerlo a un coste bajo (por lo que la discusión económica de la la siguiente sección 4.5 se ha tenido en cuenta). Atendiendo a este compromiso, se descarta el SMR sin CCS, ya que como se ha visto anteriormente, la incorporación del sistema CCS es esencial para la reducción de emisiones. Respecto a la distribución, se descarta la producción en las propias estaciones de repostaje por tres motivos: por lo menos a corto plazo, no es realista esperar que cada estación tenga capacidad propia de producir, las emisiones producidas son mayores y el coste podría ser mayor que la producción en planta central debido a economías de escala.

Así pues, con objeto de comparar y obtener conclusiones, **los métodos seleccionados son dos: SMR con CCS y electrólisis de la red, ambos con distribución de GH2 desde una planta central (tanto para 2017 como para 2050)**. El mejor método ya está claro que es SMR con CCS, pero se va a seleccionar también la electrólisis para comparar. Las emisiones de  $CO_2$  asociadas a la producción y distribución mediante dichos métodos son 0.032 y 0.024  $kgCO_{2eq}/MJ$  de  $H_2$  para el SMR con CCS. Para la electrólisis de la red las emisiones de  $CO_2$  asociadas son 0.137 y 0.07  $kgCO_{2eq}/MJ$  de  $H_2$ . Las dos parejas de resultados se dan para 2017 y para 2050 respectivamente.

Respecto a las emisiones asociadas al consumo de combustible, para el caso del  $H_2$ , se va a asumir que las emisiones producidas por la quema de lubricante son despreciables y por lo tanto las emisiones de  $CO_2$  son nulas. Para la gasolina, a falta de datos de emisiones de  $CO_2$  con gasolina de los vehículos considerados (Tabla 4.1), se va a asumir que cada litro de gasolina consumido genera aproximadamente 2.3  $kg$  de  $CO_2$  [12], lo cual se traduce en 3.15  $kg$  de  $CO_2$  por cada  $kg$  de gasolina teniendo en cuenta su densidad (Tabla 3.1).

Ya con los valores de emisiones de  $CO_2$  de producción, distribución y consumo de combustible, puede calcularse los valores totales de emisiones en  $kgCO_{2eq}/kg$  de combustible y representarse las emisiones de  $CO_2$  por cada 100  $km$  para los distintos vehículos analizados (Tabla 4.1), simplemente multiplicando por los consumos de combustible de la Figura 4.10. El resultado de la comparación de emisiones de los vehículos se representa en la Figura 4.12. En la Tabla 4.2, se tiene un resumen de los datos utilizados para el cálculo de las emisiones donde los datos de producción y distribución se han convertido a  $kgCO_{2eq}/kg$  teniendo en cuenta el  $PCI$  de los combustibles (Tabla 3.1).

Emisiones asociadas al <i>fuel cycle</i> en $kgCO_{2eq}/kg$ de combustible		
Combustible	Gasolina	Hidrógeno
Producción y distribución ( $H_2$ con SMR+CCS ; 2017)	0.99	3.84
Producción y distribución ( $H_2$ con SMR+CCS ; 2050)	0.99	2.88
Producción y distribución ( $H_2$ con electrólisis; 2017)	0.99	16.44
Producción y distribución ( $H_2$ con electrólisis; 2050)	0.99	8.40
Consumo de combustible	3.15	0
Emisiones totales ( $H_2$ con SMR+CCS ; 2017)	4.14	3.84
Emisiones totales ( $H_2$ con SMR+CCS ; 2050)	4.14	2.88
Emisiones totales ( $H_2$ con electrólisis; 2017)	4.14	16.44
Emisiones totales ( $H_2$ con electrólisis; 2050)	4.14	8.40

Cuadro 4.2: Emisiones de  $CO_2$  asociadas a la producción, distribución y consumo del combustible.

Como se observa en la Tabla 4.2, en la producción de  $H_2$  mediante SMR con CCS se generan más emisiones de  $CO_2$  que en la producción de gasolina (tanto para 2017 como para 2050). Por otra parte, la producción mediante electrólisis de la red genera hasta un orden de magnitud de mayor cantidad de emisiones que la producción de gasolina.

De la Tabla 4.2, teniendo en cuenta las emisiones asociadas al consumo de combustible, las emisiones totales del  $H_2$  producido resultan ser inferiores a las de la gasolina cuando el  $H_2$  se produce por SMR con CCS. Sin embargo, cuando el  $H_2$  se produce mediante electrólisis de la red, las emisiones en  $kgCO_{2eq}/kg$  son de hasta 4 veces superior en 2017 y 2 veces superior en 2050.

Analizando la Figura 4.12, se visualizan mejor las emisiones totales producidas, en  $kg$  de  $CO_2$  cada 100  $km$ . Se observa que con  $H_2$  producido por SMR con CCS, las emisiones de  $CO_2$  son notablemente inferiores a la operación con gasolina, tanto para 2017 como para 2050. En el caso de SMR con CCS en 2050, se conseguiría reducir en un 76 % los  $kg$  de  $CO_2$  emitidos cada 100  $km$  de operación del BMW *Hydrogen* 7. Está gran reducción se debe por una parte a que el consumo de gasolina genera  $3.15 kgCO_{2eq}/kg$  de combustible, mientras que el de  $H_2$  se puede asumir que genera 0. Por otra parte, se debe a que el consumo de hidrógeno es notablemente inferior al de la gasolina (Figura 4.10) y por lo tanto las emisiones generadas en la producción y distribución de  $H_2$  no son suficientes para generar más  $CO_2$  que la gasolina cada 100  $km$  de recorrido del vehículo.

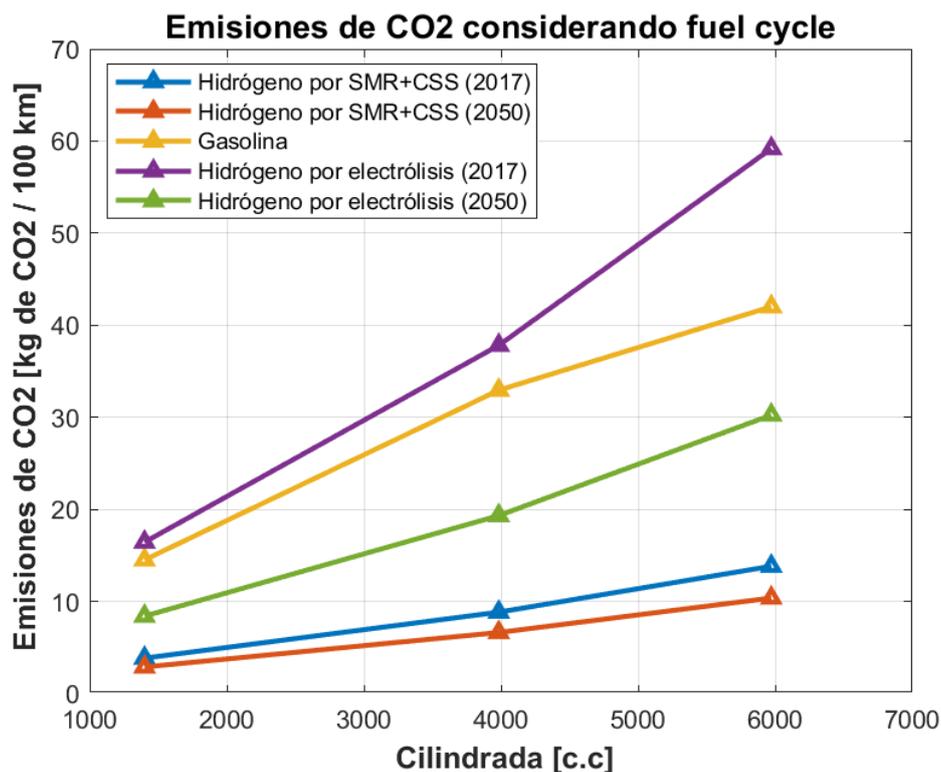


Figura 4.12: Emisiones de  $CO_2$  considerando *fuel cycle* (producción, distribución y consumo del combustible) para los vehículos de la Tabla 4.1.

De la Figura también se observa que para SMR con CCS la reducción de emisiones ocasionada por el paso del tiempo (de 2017 a 2050) tiene poca influencia si se compara con las emisiones de los vehículos de gasolina.

Si la producción de  $H_2$  es mediante electrólisis, en 2017 se generan más emisiones cada 100  $km$  que si se opera con gasolina y por lo tanto no existe reducción de emisiones a pesar de que se esté utilizando  $H_2$ . Esto se debe a las altísimas emisiones generadas

en la producción. Afortunadamente, la Figura muestra que para 2050, las emisiones generadas ya serían inferiores a las de la gasolina, de hasta un 29% para el BMW *Hydrogen 7*. Aun así, las emisiones generadas siguen siendo superiores a las de  $H_2$  con SMR y CCS, como ya se ha visto en la Tabla 4.2 y en la Figura 4.9.

Adicionalmente, la Figura 4.12 muestra una tendencia interesante. Cuanto mejor es el método de producción de  $H_2$  (en este caso el mejor es SMR con CCS en 2050), mas horizontal es la curva de emisiones del vehículo operando con  $H_2$  y por lo tanto, menos dependiente es del consumo de combustible. Es por esto que, para el caso de SMR con CCS, cuanto mayor es la cilindrada del motor, mayor es el consumo de combustible y mayor es la reducción de emisiones de  $CO_2$  obtenida si se opera con  $H_2$  en lugar de gasolina. Esto sugiere que los beneficios de reducción de emisiones de  $CO_2$  podrían ser mucho mayores si se aplicara a vehículos de mayor cilindrada (todoterrenos, camiones etc.).

### Comparación con otros combustibles

A parte de la gasolina, que es en esencia el combustible al cual el hidrógeno debe sustituir, es interesante hacer la comparación con combustibles alternativos. En la Tabla 4.3, se tienen los consumos de energía y combustible en kilos cada 100 kilómetros de operación para diversidad de tipos de vehículos de automoción. Las siglas representan: BEV (*Battery Electric Vehicles* o vehículo de batería eléctrica), FCV (*Fuel Cell Vehicle* o vehículo de pila de combustible), HICE (*Hydrogen Internal Combustion Engine* o MCI de hidrógeno) y HEV (*Hybrid Electric Vehicle* o vehículo híbrido eléctrico). Se observa que el HICE, que representa el vehículo en cuestión del trabajo, es el segundo que menos consumo de combustible tiene, solamente por detrás del  $H_2$  FCV que además también utiliza hidrógeno como combustible. Es interesante ver que el consumo de 3.84 kilos entra dentro del rango de consumo recopilados en la Figura 4.10. En términos de energía, es el segundo mas alto junto con la gasolina debido al alto *PCI* del hidrógeno.

Consumos de energía y combustible en operación			
Vehículo	Consumo de energía [kWh/100km]	Consumo de energía [MJ/100km]	Consumo de fuel [kg/100km]
BEV	14.5	52.2	-
$H_2$ FCV	24.4	87.84	0.73
Diesel ICE	45.4	163.44	3.84
HICE	58.7	211.32	1.76
CNG ICE	67.3	242.28	5.15
Gasolina ICE	58.7	211.32	4.87
Gasolina HEV	39.5	142.2	3.28

Cuadro 4.3: Consumos de energía y combustible en la operación de diferentes tipos de vehículos [19, 18].

## 4.5. Análisis económico

Actualmente el hidrógeno es notablemente más costoso de producir y transportar que los combustibles tradicionales [22]. Es por esto que, a pesar de su larga lista de ventajas y de la creciente necesidad de reducir las emisiones con proveedores de energía más verdes y sostenibles, la transición al hidrógeno no es inmediata. Es imperativo realizar un análisis económico para establecer la mejor estrategia de producción y distribución del hidrógeno, que por lo menos sea capaz de ser competitiva económicamente frente a los combustibles fósiles. Solo así la comercialización a gran escala es posible. Además, en el análisis económico hay que tener en cuenta simultáneamente los impactos ambientales de cada estrategia considerada, afín de no destruir el propósito del  $H_2$  como combustible en el proceso de diseñar la estrategia más barata.

En esta sección se pretende hacer un análisis del coste del hidrógeno basándose en una recopilación de información de la bibliografía, para entender que factores influyen en el coste y cuáles son las mejores estrategias. Se va a diferenciar el coste de producción, distribución y operación. Las ideas principales de esta sección son las siguientes:

- Actualmente, el  $H_2$  es más costoso que los combustibles convencionales.
- Es necesario diseñar estrategias económicas para su producción y distribución.
- Es crucial considerar los impactos ambientales

### 4.5.1. Factores que afectan al coste

El coste del  $H_2$  está afectado principalmente por los siguientes factores:

- Coste de producción
- Coste de transporte
- Coste de purificación
- Comercio de carbono

El coste de purificación está directamente relacionado con el coste de producción y se distingue para los distintos métodos que existen. También depende de la aplicación, los FCV (*Fuel Cell Vehicles* o vehículos de pila de combustible) requieren un altísimo nivel de purificación del  $H_2$  mientras que los HICE no requieren tan alta purificación.

El comercio de carbono o comercio de derechos de emisión es un instrumento para la disminución de emisiones contaminantes (principalmente gases de efecto invernadero) que se basa en crear incentivos económicos de manera que dicha reducción se produzca de forma costo-efectiva [47].

## 4.5.2. Coste de la producción de hidrógeno

En este apartado, en primer lugar se procede a describir las ventajas y desventajas de la producción mediante combustibles fósiles o electrólisis de agua, relacionadas principalmente con aspectos económicos. Después se citarán datos reales de costes de producción de la bibliografía que confirman lo expuesto en la primera parte.

### Ventajas/desventajas de la producción de combustibles fósiles o electrólisis

Producción a partir de combustibles fósiles	
Ventajas	Inconvenientes
Menor coste de producción (-\$)	Requiere CCS (+\$)
Tecnología desarrollada y madura	Mayores emisiones en el futuro
Producción a gran escala (-\$)	Requiere purificación (+\$)
Recursos abundante	Dependiente de combustibles fósiles

Cuadro 4.4: Ventajas y desventajas de la producción a partir de combustibles fósiles.

Producción a partir de electrólisis de agua	
Ventajas	Inconvenientes
No requiere purificación (-\$)	Mayor coste de producción (+\$)
Menores emisiones en el futuro	Mayores emisiones actualmente
0 emisiones con $H_2$ verde	Tecnología en desarrollo
Producción en las estaciones de repostaje	Pequeña escala de producción
No depende de combustibles fósiles	Coste/emisiones dependen del mix eléctrico

Cuadro 4.5: Ventajas y desventajas de la producción por electrólisis de agua.

Analizando las Tablas 4.4 y 4.5, lo más importante es que la producción a partir de combustibles fósiles es más barata. Esto por una parte es una buena noticia ya que es la tecnología más desarrollada y madura de producción de  $H_2$ . Por otra parte, esto puede desincentivar las inversiones en producción por electrólisis, la cual se sabe que generará menores emisiones a largo plazo por su relación con los mix energéticos.

Además, como se ha visto en la sección 4.4, producción con combustibles fósiles requiere de CCS para reducir la emisiones de  $CO_2$ . Esto no solo contribuye a aumentar el coste si no también a producir más emisiones de  $NO_x$  debido a mayor uso de energía [16].

Otro factor importante es la purificación. En la Tabla 4.6, se muestra el contenido de hidrógeno en % del hidrógeno producido mediante carbón, gas natural y electrólisis de agua. Se observa que la electrólisis produce un  $H_2$  prácticamente 100% puro por lo que no hay coste asociado de purificación. Mientras tanto, el carbón y el gas natural alcanzan purificaciones del 55 y 74% respectivamente y por ello tienen costes asociados. Otra información relevante de la tabla es que el coste de purificación se reduce considerablemente cuando aumenta la capacidad de producción.

Emisiones asociadas al <i>fuel cycle</i> y al consumo ( $kgCO_{2eq}/kg$ )			
Fuente de producción	Carbón	Gas natural	Electrólisis de agua
Contenido en hidrógeno (%)	55	74	99.999
Coste (USD/kg $H_2$ ) (1000 $Nm^3/h$ )	1.47	0.96	-
Coste (USD/kg $H_2$ ) (10000 $Nm^3/h$ )	0.39	0.33	-
Reducción del coste de purificación	73.45 %	63.33 %	-

Cuadro 4.6: Análisis del coste de purificación [34].

La producción mediante combustibles fósiles precisamente puede hacerse a grandes escalas, mientras que la electrólisis está mas limitada. Por ello la primera opción se beneficia de un coste reducido por economías de escala. Aún así, la pequeña escala de la electrólisis habilita su producción directamente en las estaciones de repostaje.

Por último, el coste de la producción por electrólisis es altamente sensible al coste de la electricidad y por tanto, a los mix energéticos. La promoción y aplicación de electricidad renovable proporciona una nueva manera de reducir el precio de la electricidad para la producción de  $H_2$  por electrólisis de agua.

### Datos reales de costes de producción

Luo et al. [34] establecieron un modelo económico del hidrógeno como energía en China desde 5 aspectos: coste de recursos materiales, coste fijo, coste de purificación, coste de comercio de carbono y coste de transporte, para  $H_2$  transportado en forma de gas comprimido o liquido criogénico y producido por carbón, gas natural o electrólisis de agua. Se encontró que el coste de producción por carbón o gas natural es actualmente menor y está muy afectado por el coste de purificación y el comercio de carbono.

En la Figura 4.13, se muestra el coste actual y la previsión para 2030 de la producción de  $H_2$  así como la proporción del coste asociada a los recursos materiales. Se observa que el coste de la electrólisis es altamente dependiente del coste de los recursos materiales y que este habrá descendido drásticamente en 2030. Aun será la vía más costosa pero ya será competitiva con el resto.

Li et al. [33] revisaron las perspectivas de  $H_2$  como portador de energía para el sector del transporte, clarificaron los factores que más influyen el coste en USA y China y demostraron el potencial del  $H_2$  para reducir el coste de  $H_2$  transportado. Respecto a los costes de producción, encontraron que los costes del  $H_2$  a través de carbón y gas natural son inferiores a 2 USD/kg. El coste añadido del CCS supone de 0.4-0.9 USD/kg. Mientras que el coste de producción por electrólisis varía entre 2.6 hasta 12.3 USD/kg debido a la volatilidad de los precios de la electricidad.

### 4.5.3. Coste de la distribución de hidrógeno

Entre los factores que influyen el coste de producción están:

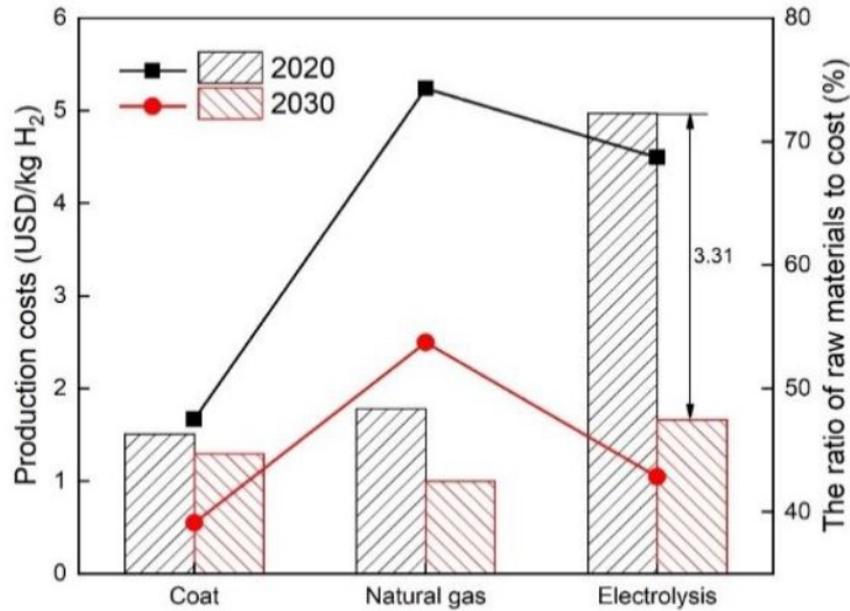


Figura 4.13: Previsión de coste de producción y de recursos materiales [34].

- Método de distribución
- Volumen de distribución
- Radio de distribución

En primer lugar, el  $H_2$  tiene la característica de una muy baja densidad, por lo que inevitablemente su coste de distribución es mayor al de los combustibles convencionales. Respecto al transporte mediante camiones, para aumentar la densidad, tanto comprimir el gas como llevar a cabo el proceso de licuefacción tiene un gasto de energía y por tanto un coste asociado. El coste de licuefacción es superior al coste de compresión. No obstante, el LH2 ofrece mayor densidad que el GH2, por lo que puede transportar mayor cantidad de  $H_2$  por viaje. Concretamente, un mismo trailer transportando LH2 puede llevar entre 3500-4500 kg de  $H_2$  mientras que transportando GH2 solo lleva entre 200-1200 kg [33]. Esto implica menos camiones, menos entregas, menos trabajadores y menos mantenimiento. Todo esto contribuye a reducir el coste.

El coste del transporte de LH2 se ve beneficiado por un mayor volumen y radio de distribución, mientras que el transporte de GH2 es más apropiado para poco volumen y corto radio [34]. Esto se debe a que el coste del GH2 es muy sensible a la distancia transportada mientras que el coste de LH2 varía poco. Esto se muestra claramente en la Figura 4.14. Concretamente, para este estudio es a partir de 500 kilómetros cuando el transporte de LH2 comienza a ser más económico que el de GH2. Además, con el aumento de demanda de  $H_2$  que se espera en el futuro, el volumen de  $H_2$  a transportar será mayor y por tanto el transporte de LH2 será más competitivo para corto radio de distribución.

Las mismas conclusiones se obtienen del resto de la literatura. La distribución de LH2 se hace competitiva económicamente frente a GH2 a partir de entre 200-400 km [38, 39].

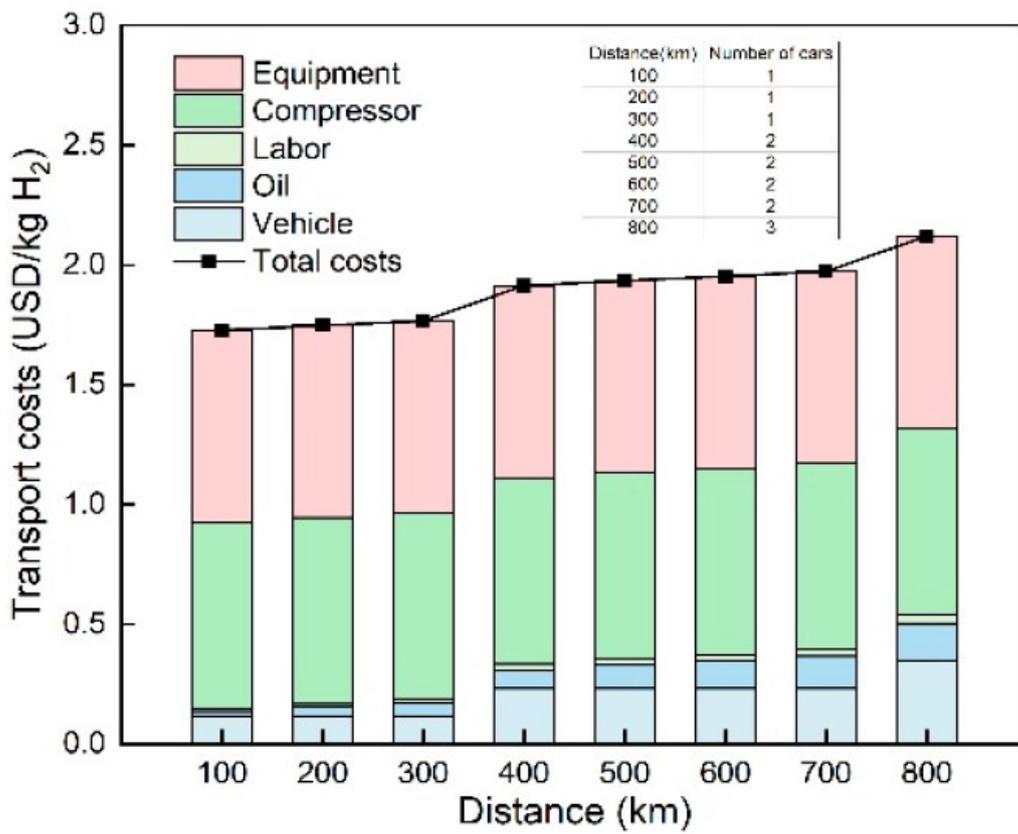
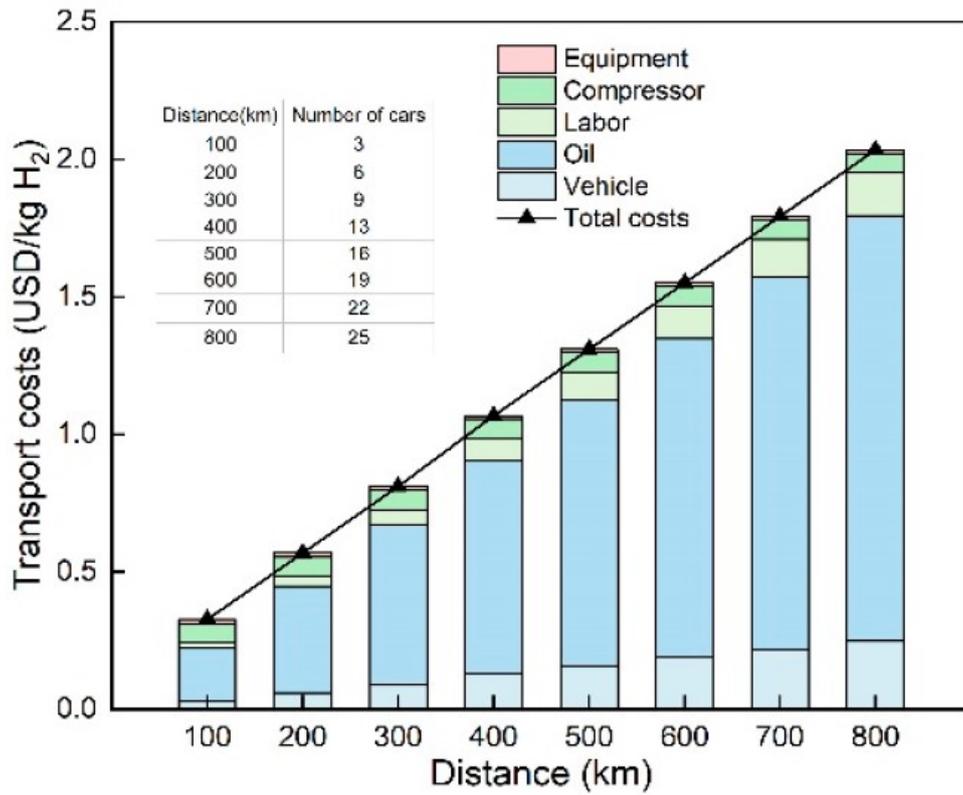


Figura 4.14: Coste del transporte de  $H_2$  (GH<sub>2</sub> y LH<sub>2</sub> figuras superior e inferior respectivamente) para una demanda de 10 toneladas al día en China [34].

#### 4.5.4. Coste de la operación del vehículo

Para estimar el coste de la operación de un vehículo de combustión con  $H_2$ , se necesita el coste total del  $H_2$ , teniendo en cuenta por lo menos el coste de producción y el de distribución. Dado que la transición al  $H_2$  no es algo que vaya a ser inmediato, es más representativo tomar valores de costes previstos en el futuro. Si se toman las estimaciones de Li et al. [33], el coste total del  $H_2$  distribuido en USA será de entre 4.3-8 USD/kg para 2030, asumiendo un adopción del  $H_2$  a gran escala. Para poder explorar distintas posibilidades se van a tomar el valor mínimo, el máximo y el valor medio, que equivale a **6,15 USD/kg de  $H_2$** .

Se pretende comparar el coste con el de la gasolina, ya que es el combustible al que el  $H_2$  deberá sustituir. Así pues, se busca una estimación del precio de la gasolina para 2030, también en USA. Se predice que en 2030 el precio de la gasolina será de 4.04 USD/gal en USA [37]. 1 galón estadounidense equivale a 0,00378541 metros cúbicos y de acuerdo con la densidad de la gasolina establecida en la Tabla 3.1, 1 galón de gasolina equivale a 2.7633 kg y por lo tanto **el precio de la gasolina será de 1.462 USD/kg**.

Con estos datos y con los datos de consumo de los vehículos analizados en la Figura 4.10, puede establecerse una gráfica comparativa del precio de la operación del vehículo por cada 100 kilómetros. Esta comparación se muestra en la Figura 4.15, donde se han considerado los distintos precios de  $H_2$  y el precio de la gasolina mencionado.

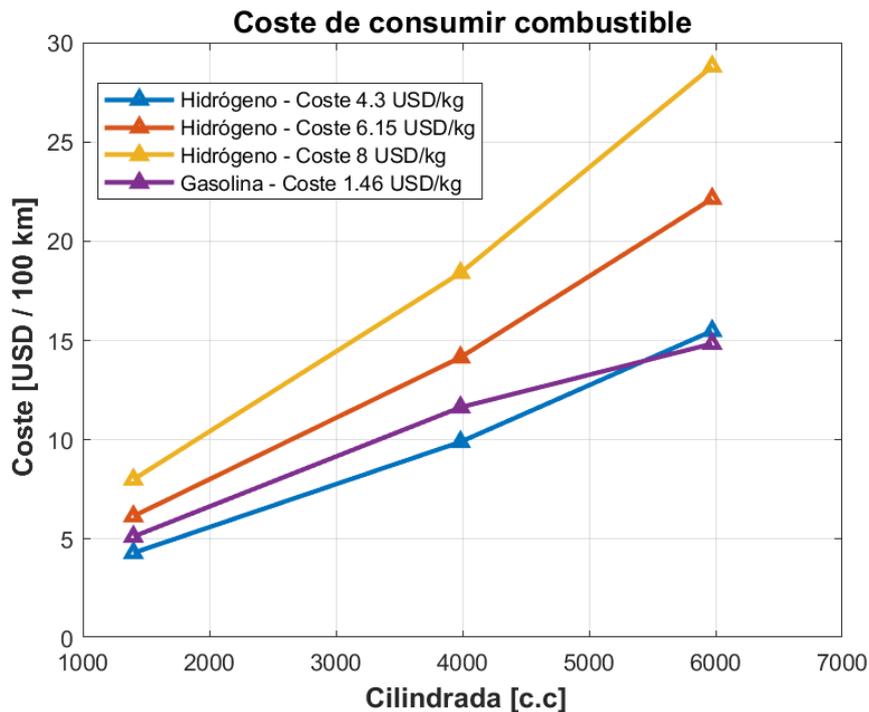


Figura 4.15: Coste previsto para 2030 de operación cada 100 km de los vehículos de la Tabla 4.1 operando con hidrógeno y gasolina.

Como se observa, en el mejor de los casos del precio del  $H_2$  dado por el estudio de Li et al. [33], el precio de operar un vehículo de hidrógeno es inferior al del vehículo de gasolina excepto en el caso del *BMW Hydrogen 7*, siendo la diferencia de menos de 1 USD. Para el precio medio, este es ligeramente superior al de gasolina, pero es competitivo.

## 4.6. Conclusiones

La transición al  $H_2$  supone muchos retos. En este capítulo estos retos se han englobado en dos: la reducción de emisiones y el desafío económico que supone.

Para reducir las emisiones de  $CO_2$ , no solo hay que fijarse en la operación del vehículo con  $H_2$ , ya que ahí estas son nulas. También es crucial analizar cómo se produce el  $H_2$  y cuantas emisiones se generan, tanto en la propia producción como en la distribución a las estaciones de repostaje. Se han presentado las principales fuentes de producción. Actualmente, la producción a partir de combustibles fósiles es la que domina el mercado (Figura 4.1). Entre los principales métodos de producción se encuentran el SMR, POX, ATR, CG, procesos de *water splitting* (entre los que se encuentra la electrólisis de agua) y procesos a partir de biomasa (sección 4.2). Para información más detallada y extensa sobre las fuentes y métodos de producción se recomienda visitar el capítulo de Acar and Dincer [2]. Entre los métodos de distribución posibles (apartado 4.2.5), está el transporte de GH2 o LH2 (en trailer o barco, por citar ejemplos), la distribución a través de redes de tuberías o la propia producción en la estaciones de repostaje (que no requeriría de distribución).

Entre los métodos de producción presentados, el único que es capaz de generar potencialmente 0 emisiones es la electrólisis de agua (o alguno de los otros métodos alternativos de *water splitting*), por eso es tan interesante. Este proceso requiere de electricidad como fuente de energía. Por lo tanto, la generación de emisiones está a ligada dicha electricidad y a cómo se produce. Si la electricidad se produce a partir de combustibles fósiles, habrán emisiones asociadas. Si se produce a partir de ER, las emisiones pueden ser casi nulas. Las fuentes de energía utilizadas para producir la electricidad de la red se representan en los Mix energéticos de la sección 4.3. Actualmente, está dominada por las energías fósiles, pero afortunadamente se prevé que las energías renovables ocuparan una proporción mucho mayor en el futuro.

### 4.6.1. Emisiones asociadas al ciclo de combustible del $H_2$

Tras un estudio bibliográfico, en la sección 4.4 se ha hecho un análisis de las emisiones generadas en la producción del  $H_2$ , su distribución y su consumo. Las conclusiones obtenidas más relevantes son las siguientes:

- Las emisiones generadas en la electrólisis son altamente sensibles a la procedencia de la electricidad. Si la electricidad procede de ER, las emisiones generadas son bastante inferiores a si la electricidad viene de la red eléctrica. Las ER que generan menos emisiones en la electrólisis son la energía eólica y la hidroeléctrica.

- La producción de  $H_2$  a partir de combustibles fósiles genera notablemente más emisiones en comparación con la producción mediante electrólisis con ER. Sin embargo, si la electricidad viene de la red, la producción mediante combustibles fósiles genera menos emisiones.
- La incorporación del sistema CCS en la producción con combustibles fósiles disminuye considerablemente las emisiones generadas.
- Las emisiones generadas mediante cualquier proceso serán menores en el futuro, pero la producción mediante electrólisis se beneficiará más del paso del tiempo que la producción mediante combustibles fósiles. No obstante, aún en 2050, la producción con combustibles fósiles tendrá menor impacto que con electricidad de la red si incorpora CCS.
- A falta de ER y procesos de *water splitting* alternativos a la electrólisis de agua, la producción mediante combustibles fósiles con CCS es la mejor opción para minimizar el impacto ambiental de la producción de  $H_2$ . Esto se cumple incluso en 2050 debido a que los Mix energéticos todavía no serán lo suficientemente verdes.
- La producción en las estaciones de repostaje genera más emisiones que la producción en planta central y distribución a las estaciones debido a que el consumo de agua es mayor.
- Producir LH2 genera más emisiones que producir GH2 debido a que el proceso de licuefacción requiere mayor gasto de energía.

#### 4.6.2. Costes asociados al ciclo de combustible del $H_2$

Tras otro estudio bibliográfico, en la sección 4.5 se ha hecho un análisis del coste asociado a la producción del  $H_2$ , su distribución y su consumo. Las conclusiones obtenidas más relevantes son las siguientes:

- Actualmente, el coste de producir  $H_2$  es muy superior al de producir los combustibles convencionales, lo cual limita la transición al  $H_2$  [22]. Afortunadamente, el coste de producir  $H_2$  será menor con el tiempo debido a la mejora de eficiencia de los procesos, mayor demanda (economías de escala) y mayor proporción de ER en los mix energéticos.
- Reducir las emisiones de  $CO_2$  en la producción con combustibles fósiles requiere el coste adicional del sistema CCS y también de costes de purificación. Aun así, el coste de producir por electrólisis es muy superior al de producir por combustibles fósiles.
- El coste de la electrólisis es muy sensible al precio de la electricidad. Las ER contribuyen a reducir el precio de la electricidad y por tanto de la electrólisis. Así pues, la producción mediante electrólisis será competitiva económicamente en el futuro con la producción mediante combustibles fósiles en parte debido a la mayor proporción de ER en los mix energéticos.

- La producción en una planta central es más económica que la producción en las estaciones de repostaje debido a economías de escala.
- La producción de LH2 es más costosa que la de GH2 pero su distribución es más económica debido a su mayor densidad, aunque depende de la distancia y del volumen de distribución.
- A día de hoy, la distribución a corta distancia de GH2 es más económica que la de LH2. Sin embargo, debido a que el coste de distribución de LH2 disminuye con la distancia y el volumen de distribución, y teniendo en cuenta el aumento de demanda de  $H_2$  previsto, la distribución del LH2 será el método más apropiado de cara al futuro.

### 4.6.3. Conclusiones globales de ambos estudios

Combinando las conclusiones de ambos análisis, puede decirse que **los combustibles fósiles, a pesar de todos sus inconvenientes, son fundamentales para la transición al hidrógeno**. Como ya se ha comentado, a día de hoy no es realista producir todo el  $H_2$  con ER porque no van a estar al alcance de todos los electrolizadores. Por lo tanto, la producción en masa de  $H_2$ , si se hiciera mediante electrólisis, dependería de la electricidad de la red y como se ha visto en la sección 4.3, el conjunto de energías primarias que alimentan la red consta en buena parte de combustibles fósiles. Por ello la producción en masa mediante electrólisis tiene mucha cantidad de emisiones asociadas que destruyen el propósito, generando más emisiones que la producción con combustibles fósiles. Al mismo tiempo, la electrólisis es muy costosa, mientras que la producción con combustibles fósiles es la más económica.

Resumiendo, hoy en día la producción en masa de  $H_2$  mediante combustibles fósiles genera menos emisiones que mediante electrólisis (con electricidad de la red) y además es también mucho más preciada. Por estos motivos, **la producción en masa de  $H_2$  debe hacerse vía combustibles fósiles con CCS**. De cara al futuro, debe hacerse un esfuerzo en "limpiar" los mix energéticos para que contengan una proporción dominante de renovables y energías limpias. A medida que esto se este consiguiendo, la producción de  $H_2$  con menor impacto ambiental será la producción por electrólisis. Asimismo, esta será considerablemente más económica (competitiva con los combustibles fósiles). Por lo tanto, **en unas décadas, la producción en masa de  $H_2$  deberá hacerse mediante electrólisis**.

### 4.6.4. Conclusiones de los resultados obtenidos de la operación del vehículo cada 100 km

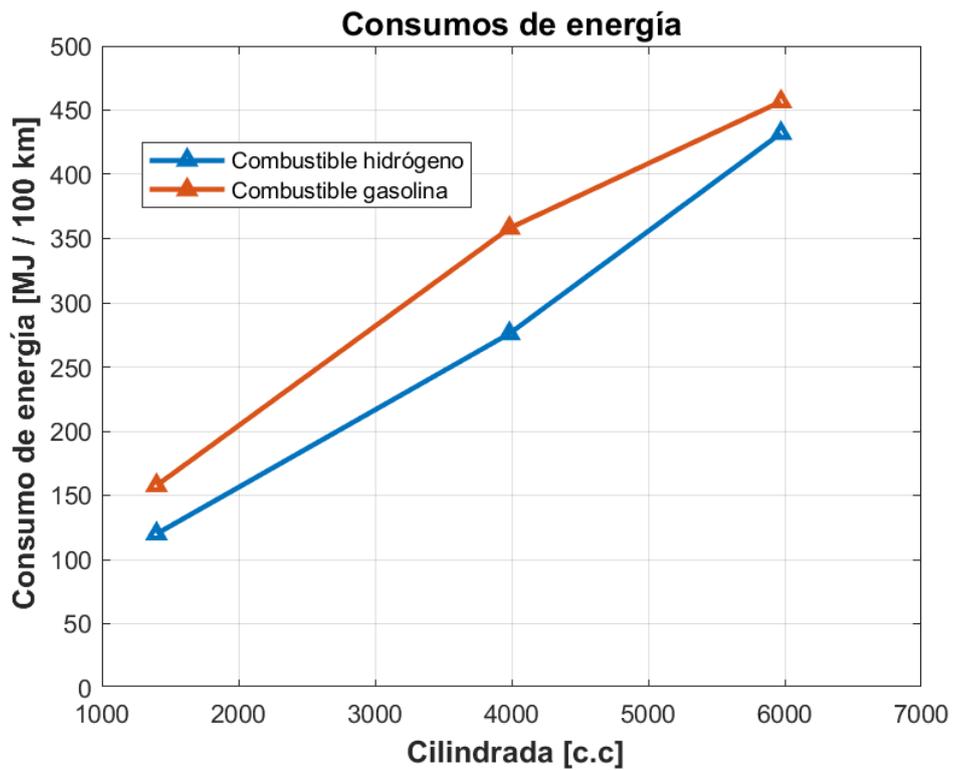
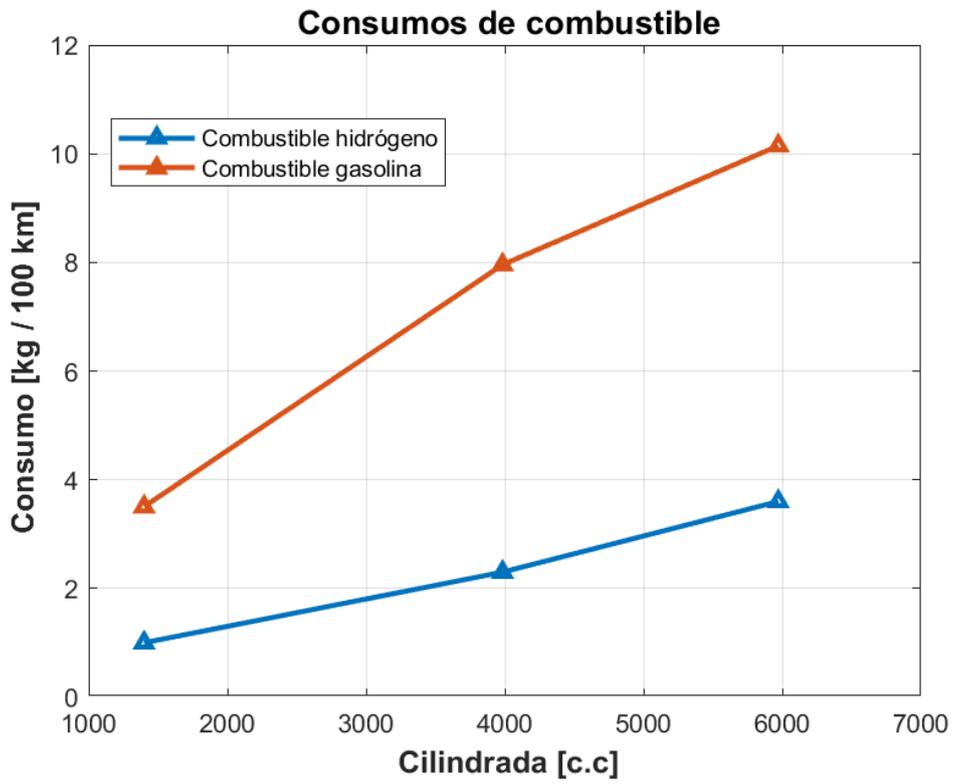
Además de los estudios bibliográficos, en las secciones 4.4 y 4.5 se han obtenido resultados de la operación de vehículos reales operando con  $H_2$  y gasolina en términos de consumo de combustible, consumo de energía, emisiones de  $CO_2$  y coste de repostaje, todos cada 100 *km* de recorrido del vehículo. En los resultados de emisiones de  $CO_2$  se han tenido en cuenta las emisiones asociadas a la producción, distribución y consumo del combustible. En los resultados de los costes de operación, se han tenido los costes

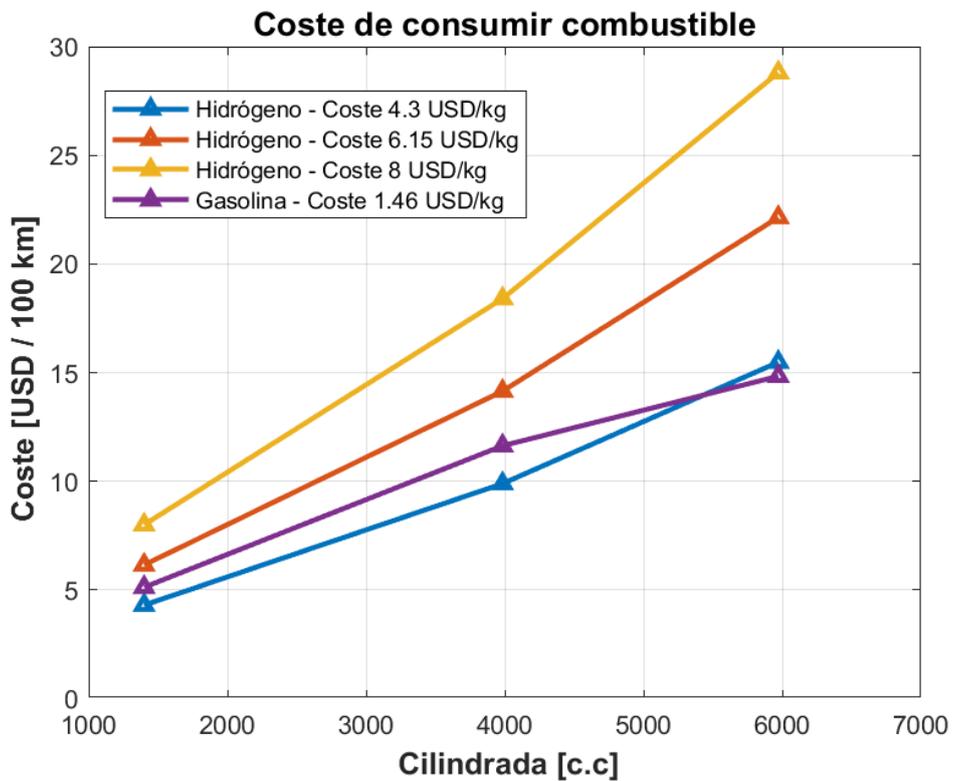
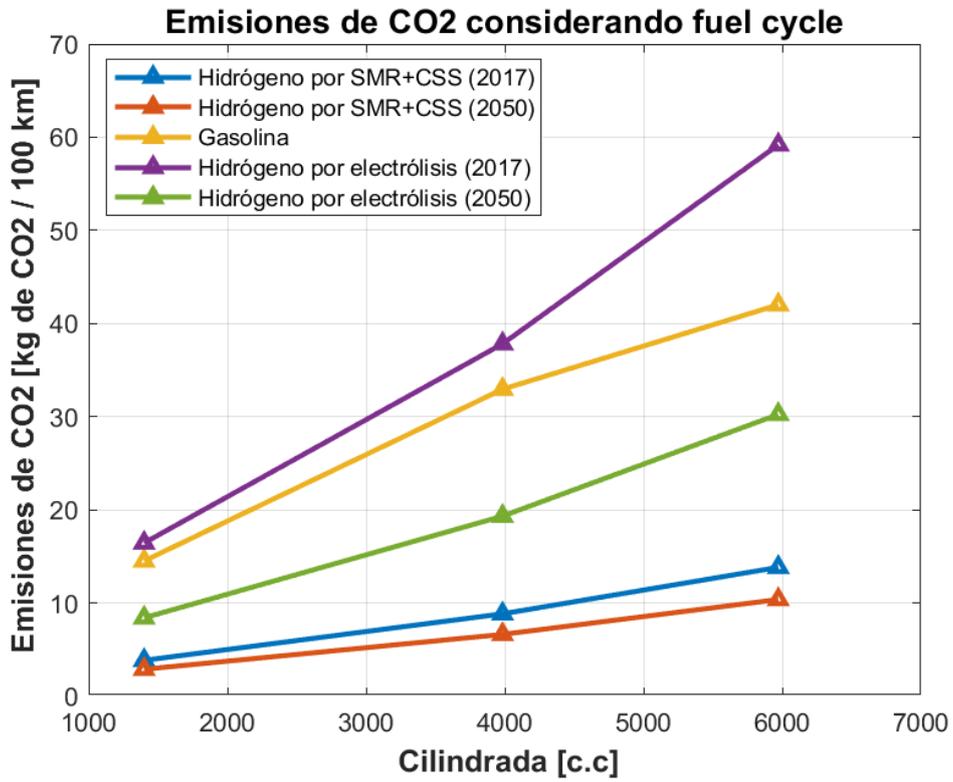
de producción y distribución del combustible. Los vehículos seleccionados se recopilan en la Tabla 4.1. Las conclusiones obtenidas son las siguientes:

- Los vehículos de  $H_2$  no solo consumen menos combustible que los de gasolina (Figura 4.10) si no que también consumen menos energía (Figura 4.11).
- La producción de  $H_2$  mediante SMR con CCS o electrólisis de la red, para 2017 y para 2050, genera más emisiones de  $CO_2$  que la producción de gasolina (Tabla 4.2).
- Debido a que el consumo de  $H_2$  no produce  $CO_2$  y además el consumo de  $H_2$  es inferior al de la gasolina (Figura 4.10), por cada 100 km que recorre un vehículo, si consume gasolina genera muchas más cantidad de  $CO_2$  que si consume  $H_2$  producido por SMR con CCS en 2017 o en 2050 (Figura 4.12).
- La reducción de emisiones de  $CO_2$  asociadas a la evolución temporal tiene poca influencia si el  $H_2$  es producido por SMR con CCS y mucha influencia si es producido por electrólisis de la red (Figura 4.12).
- Debido a las altísimas emisiones en la producción de  $H_2$  con electrólisis de la red, el consumo de  $H_2$  en un vehículo en 2017 genera más emisiones que el consumo de gasolina (Figura 4.12).
- Debido a la notable mejora con el paso del tiempo en las emisiones generadas en la producción de  $H_2$  mediante electrólisis de la red, en 2050 las emisiones del consumo de  $H_2$  producido de esta forma ya serán inferiores a las del consumo de gasolina (Figura 4.12).
- Cuantas menos emisiones genera un método de producción de  $H_2$ , mayor es la reducción de emisiones conseguida cuando se aumenta la cilindrada y el consumo del vehículo (Figura 4.12).
- El coste de conducir un vehículo de  $H_2$  depende mucho del coste de producir el  $H_2$  y por lo tanto del método para producirlo. Tomando valores de costes de Li et al. [33] y valores de costes de gasolina [37], (ambos previsiones futuras), en la Figura 4.15, se observa que operar un vehículo de  $H_2$  será más caro que operar uno de gasolina excepto en el mejor de los casos del estudio.

La conclusión más importante de estos resultados y en el marco de este trabajo se obtiene de la Figura 4.12 y es que actualmente, en Europa, no se debe producir  $H_2$  mediante electrólisis de la red (ni por reducir emisiones ni por reducir costes) ya que el consumo de este  $H_2$  genera más emisiones en la producción y distribución que si se consume gasolina. Se debe producir  $H_2$  mediante SMR con CCS, tanto ahora como a largo plazo, hasta que los mix energéticos sean lo suficientemente verdes.

Finalmente, a modo de resumen y con objeto de visualizar los resultados obtenidos del capítulo, se presentan una vez más los cuatro gráficos de operación: consumo de combustible, consumo de energía, emisiones totales y costes totales.





### 4.6.5. Limitaciones

Todas las conclusiones del análisis de emisiones y económico (secciones 4.4 y 4.5) están sujetas a las condiciones de los estudios de la bibliografía que se han analizado. Entre dichas condiciones están el lugar de estudio, el año de estudio y los métodos de producción y distribución analizados. No obstante, debido a que se han analizado una serie de estudios y de todos se obtienen tendencias similares, las tendencias descritas en las conclusiones se pueden considerar válidas, ya que no se está hablando de resultados absolutos, si no de tendencias.

Otra limitación del análisis es respecto al coste de purificación (Tabla 4.6). El estudio de Luo et al. [34] esta hecho para FCVs. Los FCVs necesitan un  $H_2$  con un nivel de purificación altísimo (prácticamente del 100%), pero los HICE pueden operar con  $H_2$  de menor calidad y pueden no necesitar purificación incluso cuando este se produce por gas natural o carbón. Este hecho favorece la producción de vehículos de combustión con hidrógeno en lugar de FCVs, ya que el coste de estos será menor.

Respecto a las cuatro gráficas de operación, todas están limitadas por el número de vehículos que se han analizado. La figura de resultados de emisiones de  $CO_2$  está sujeta a los métodos de producción y distribución seleccionados (SMR con CCS y electrólisis de la red, ambos con distribución de GH2 desde una planta central, tanto para 2017 como 2050). Otro método generaría una curva de mayores o menores emisiones. La gráfica de costes de operación es altamente dependiente del coste del hidrógeno seleccionado.

Por último, todo el análisis hecho en este capítulo podría verse truncado por los impactos de la guerra en Ucrania. A pesar de esto, las influencias más probables y relevantes se han descrito en el apartado 4.3.

# 5. Procedimiento experimental

## 5.1. Introducción

Previo a pasar a analizar los resultados obtenidos en los ensayos experimentales que se realizarán en el CMT-Motores Térmicos, es preciso describir las condiciones en las que se han realizado y los parámetros que se han fijado para realizar las medidas. El capítulo se divide en sala de ensayos, puntos experimentales y plan de ensayos.

## 5.2. Sala de ensayos

En esta sección se pretende hacer una descripción de la sala de ensayos 5 del CMT-Motores Térmicos donde se realizaran los ensayos experimentales. Para apoyar la descripción, en la Figura 5.1 se muestra un esquema de la sala.

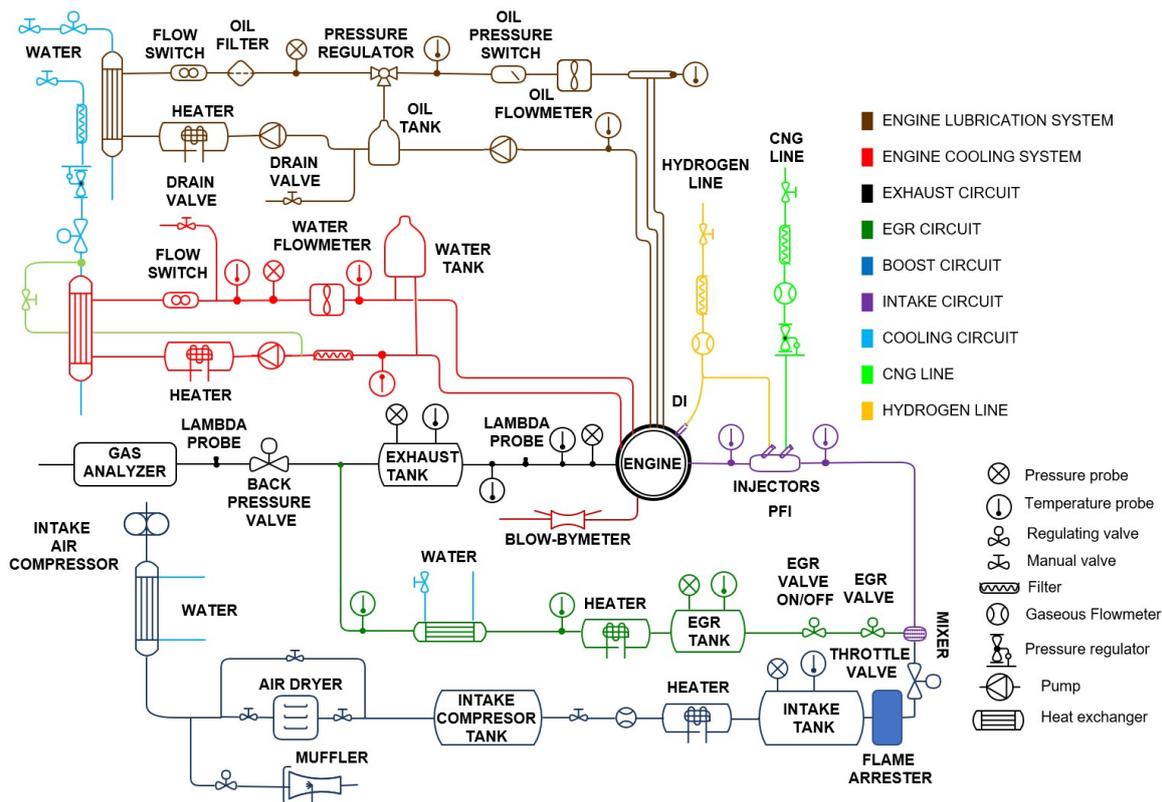


Figura 5.1: Esquema de la sala de ensayos experimentales

## Motor

El motor de la sala es un motor de encendido provocado de cuatro tiempos (MEP de 4T) que cuenta con multitud de características: posibilidad de inyección directa e inyección en puerto, sistema de distribución variable de válvulas (VVT) y sobrealimentación. Es un motor creado para la investigación de la combustión y renovación de la carga y originalmente fue diseñado para operar con gasolina, aunque ahora se ha adaptado para poder operar con gas natural comprimido (CNG) o hidrógeno. Algunos parámetros como la relación de compresión del motor no se han modificado y por ello es posible que no sean óptimos para la operación con CNG o  $H_2$ .

Al poder operar con inyección directa o en puerto, el motor ofrece un amplio espectro de optimización para minimizar emisiones y maximizar prestaciones.

Cabe destacar que el motor es monocilíndrico debido a que está destinado a la investigación. Al contar con un solo cilindro, la potencia que produce es relativamente baja. Por este motivo, el sistema de lubricación, refrigeración y sobrealimentación es externo al motor. Esto significa que el motor no se encarga de operar el turbogrupo para la sobrealimentación, ni las bombas de agua y aceite para la refrigeración y lubricación respectivamente, ya que esto supondría unas pérdidas mecánicas que el motor no es capaz de superar.

Al mismo tiempo, el calor que se genera en el cilindro es mucho menor que el que generaría un motor policilíndrico equivalente y no es suficiente para calentar el refrigerante y lubricante a la temperatura de operación que se requiere.

En la Tabla 5.1, se listan las especificaciones técnicas del motor.

## Bancada

El propósito de la bancada es amortiguar las vibraciones que produce el motor, evitando que estas se propaguen al resto de la instalación. Es un elemento de seguridad indispensable en la sala. Consta de una base móvil que es soportada por una serie de perfiles IPE 180 y UPN 180. La amortiguación se consigue mediante resortes [5].

## Sistema de admisión

El sistema de admisión, representado en la Figura 5.1 por la línea morada, se encarga de proporcionar las condiciones de sobrealimentación que se tendrían en el motor policilíndrico equivalente.

Cuenta con un compresor externo de tornillo rotativo que está refrigerado por agua. Para dar potencia al compresor, como ya se ha comentado, el motor no es el encargado; la sala cuenta con un motor eléctrico que acciona el compresor. La presión se regula variando el régimen del motor eléctrico. Para ayudar en esta tarea, el sistema cuenta con un regulador tipo PID que también regula la temperatura, una válvula de regulación y un variador de frecuencia.

---

Number of cylinders	1	
Number of strokes	4	
Cylinder bore	82 mm	
Cylinder stroke	86 mm	
Displaced volume	454 cm <sup>3</sup>	
Combustion system	4-valve pent roof GDI	Otto cycle
Fuel	Gasoline min 95 RON	Quality: EN228
Injection system	DI side position; PFI injection	Single injector
Ignition system	Ignition coil + cable	
Engine management system	AVL PREMS GDI	
Idle speed	700 rpm	
Rated speed	6000 rpm	
Maximum speed	6400 rpm	
Maximum boosting pressure	3 bar abs	
Maximum exhaust pressure	3.5 bar abs	
Compression ratio	11.5:1	
Valves per cilinder	4	2 intake, 2 exhaust
Valve train type	DOHC	Finger follower

---

Cuadro 5.1: Especificaciones del motor

Actuando en estos elementos, se consigue proporcionar al motor con el caudal y la presión necesaria para realizar los ensayos [5].

### Sistema de escape

Representado por una línea negra en la Figura 5.1. Tiene dos funciones: evacuar los gases de escape y reproducir las condiciones de contrapresión que se tendrían debido a la turbina del turbocompresor en el motor policilíndrico equivalente.

Los gases de escape son clave para medir las emisiones contaminantes que emite el motor:  $NO_x$ ,  $CO$ , UHC y  $CO_2$ . La medida de los contaminantes se realiza en concentración volumétrica con el equipo Horiba.

El proceso de medición es el siguiente. Con una sonda situada aguas arriba de las válvulas de contrapresión, se toma una muestra de los gases. La muestra se hace pasar por un hornillo caliente donde una fracción de los gases se usan para medidas internas. Dicha fracción de gases se denomina muestra húmeda y es de aquí donde se toman las medidas de  $NO_x$  e UHC.

La parte restante se hace llegar al equipo Horiba y cuando llegan al analizador principal se enfrían hasta 5°C para causar la condensación del vapor de agua y por esto esta muestra pasa a denominarse muestra seca. De aquí se obtienen las medidas de  $CO$ ,  $CO_2$  y  $O_2$ .

Destacar que el oxígeno ( $O_2$ ) no es un contaminante, evidentemente, pero es

interesante conocer la proporción en los gases de escape ya que proporciona información interesante que se discutirá en el análisis de resultados.

Adicionalmente, el equipo Horiba es capaz de medir el EGR, el  $AFR$  y el  $\lambda$  [5].

### Sistema de refrigeración

Representado por una línea azul clara en la Figura 5.1. Empieza en un vaso de expansión que hace la función de depósito. Seguidamente, se encuentran un intercambiador de carcasa y tubos de flujo cruzado que sirven para conservar la temperatura del agua en los rangos de funcionamiento del motor.

Un PID controla una señal de temperatura con una temperatura de consigna de 90°C (especificada por el fabricante), que regula el flujo de agua.

La presión y el caudal del agua la proporciona una bomba Pierburg que conecta con la salida del intercambiador. Para que el agua obtenga la temperatura de trabajo se hace uso de una resistencia de calentamiento [5].

### Sistema de lubricación

Representado por una línea marrón en la Figura 5.1. Según el fabricante, el circuito debe poder proporcionar un caudal de 300 litros/hora y estar presurizado entre un rango de 3.5 y 4.5 bares [5].

### Circuito de combustible

Como se ha mencionado, el motor se ha adaptado para poder operar con hidrógeno y con gas natural comprimido, además de con gasolina. En la Figura 5.1 se muestran las líneas de circuito de combustible de hidrógeno y gas natural en amarillo y verde claro respectivamente. Actualmente el motor se está utilizando para investigación con  $H_2$  y  $CNG$  solamente, por eso no se muestra una línea para el circuito de gasolina en la Figura 5.1.

La cantidad de combustible inyectado se controla mediante una válvula de presión que se opera de forma manual [5].

El motor ofrece la posibilidad de operar con mezclas de  $H_2$  y  $CNG$ . Dichas mezclas se realizan en un tanque en el que convergen las líneas de ambos combustibles.

El tipo de inyección es en puerto (PFI) para el  $CNG$  y para el  $H_2$  puede ser PFI o inyección directa (DI), tal y como se observa en el esquema.

## Combustible

El combustible utilizado para los ensayos es hidrógeno. Concretamente, se va a operar con **hidrógeno gaseoso comprimido**. Dicho hidrógeno se almacena a una presión de 200 *bar* en botellas que contienen 0.8 *kg*. El total de hidrógeno que se utilizará es el de una serie de 16 botellas.

## Circuito de EGR

Representado por una línea verde oscura en la Figura 5.1. A la salida del remanso se sitúan unas válvulas de contrapresión que comienzan el circuito EGR

Antes de volver a introducir los gases en la admisión, se hacen pasar por un intercambiador de calor que reduce la temperatura [5].

## Sistema de control y adquisición de medidas

El sistema de control y adquisición de medidas utilizado es la unidad PUMA OPEN de AVL. Esta permite monitorizar la instalación definiendo los límites y autorizando el control automático de los parámetros que se requieran. Además permite la adquisición de datos.

El software del ordenador permite a los técnicos interactuar con la instalación y controlar los parámetros de los sistemas secundarios.

En la siguiente lista se definen las funciones principales de la unidad PUMA OPEN de AVL:

- La adquisición de datos que provienen de diferentes transductores y termopares entre otros elementos de medida.
- La definición de los límites de monitorización de las señales recibidas, de tal forma que, si se supera el valor el sistema produce una señal de alerta.
- La monitorización del buen funcionamiento de la instalación.
- El control automático de los parámetros deseados (régimen, grado de carga...) mediante un panel de operación.
- La compilación de las formulas para poder visualizar parámetros calculados a partir de la señal adquirida.

[5]

### 5.3. Puntos experimentales

Es conveniente definir los puntos experimentales que se han ensayado antes de pasar al análisis de los resultados. Los puntos experimentales equivalen a la configuración del motor y se definen con el régimen de giro y el grado de carga. En la Tabla 5.2 se definen los dos puntos experimentales ensayados. La energía se refiere a la cantidad de hidrógeno inyectado en cada ciclo del motor. En el análisis de resultados, se hará referencia a los puntos experimentales como 1500@4 y 1500@7 para el punto 1 y 2 respectivamente.

Punto	Régimen (rpm)	PME (bar)	Energía (mg/cc)
1	1500	4	4.96
2	1500	7	8.08

Cuadro 5.2: Puntos experimentales de los ensayos

### 5.4. Plan de ensayos

Para cada punto experimental de la Tabla 5.2 (régimen de giro y grado de carga fijos), se ha hecho un barrido del parámetro  $\lambda$ , que representa la relación aire combustible relativa (2.4). Concretamente, se ha barrido con  $\lambda$  pobres porque como se ha visto en el Capítulo 3, es con mezclas pobres y ultrapobres como se consiguen altos beneficios en rendimiento y emisiones.

Asimismo, para cada  $\lambda$  y punto experimental, se ha hecho un barrido del avance de la inyección de combustible (AI).

Además, el avance al encendido (AE) se ha ido modificando acorde al AI para que la combustión esté en fasado óptimo. El fasado óptimo se da aproximadamente por el ángulo del CA50 entre 8-10° después del PMS de la fase de compresión. Esto quiere decir que para todos los puntos se ha seleccionado el avance al encendido en el que se consigue *MBT* (el que produce mayor *PME*). De esta forma los puntos son comparables en función del AI.

#### 5.4.1. Resumen

Se han realizado ensayos en un MEP monocilíndrico de inyección directa operando con hidrógeno. En dichos ensayos se ha hecho un barrido del avance de la inyección de combustible (AI) como variable independiente y al mismo tiempo se ha variado el AE para que la combustión esté en fasado óptimo. Estos barridos de AI se han hecho para distintos valores de  $\lambda$  pobres y todo para los dos puntos experimentales de la Tabla 5.2. En la Tabla 5.3 se muestra los barridos de  $\lambda$  y los barridos de AI para cada  $\lambda$  en CAD (*Crack angle degrees* o Ángulo del cigüeñal en grados) para ambos puntos experimentales.

<b>Punto</b>	$\lambda$ [-]	<b>Avance de la inyección (CAD)</b>
1500@4	2.2	-90, -80, -70, -65, -60
1500@4	2.4	-90, -80, -70, -65
1500@4	2.6	-340, -290, -240, -190, -140, -130, -120, -110, -100, -90, -80, -70, -65
1500@4	2.8	-90, -80, -70
1500@4	3.0	-90, -80, -70
1500@4	3.2	-90, -80, -70
1500@7	2.2	-130, -120, -110, -100, -90, -80, -75
1500@7	2.4	-130, -120, -110, -100, -90, -80
1500@7	2.6	-130, -120, -110, -100, -90, -85
1500@7	2.8	-130, -120, -110, -100, -90
1500@7	3.0	-130, -120, -110, -100, -90, -85
1500@7	3.2	-130, -120, -110, -100, -90, -85

Cuadro 5.3: Barridos de  $\lambda$  y AI para cada punto experimental

---

# 6. Resultados experimentales

---

## 6.1. Introducción

Este capítulo recoge los resultados y el correspondiente análisis de los ensayos experimentales realizados en el departamento CMT-Motores térmicos, en los que se ha experimentado con hidrógeno en un motor monocilíndrico de encendido provocado e inyección directa. La sala de ensayos y el procedimiento experimental que se ha seguido se describen en el Capítulo 5.

En la sección 6.2 se analizan los resultados del primer ensayo que se hizo, en el que se inyectaba  $H_2$  tanto en ciclo abierto como en ciclo cerrado. Ciclo abierto se refiere al tiempo durante el ciclo del motor en el que hay al menos una válvula de admisión o escape abierta y el ciclo cerrado corresponde al tiempo en el que todas las válvulas están cerradas. La Figura 6.1 muestra la diferencia entre ciclo abierto y cerrado.

En las secciones 6.3, 6.4 y 6.5 se estudian los resultados del resto de los ensayos experimentales en términos de la combustión, las prestaciones y las emisiones respectivamente. Respecto a la combustión, se analiza el avance al encendido (AE) y la duración de la mezcla en función del avance a la inyección (AI) y  $\lambda$ . También se describe la evolución de las presiones en el cilindro para las distintas configuraciones. En la parte de prestaciones se analiza principalmente la *PMI* en función del AI y  $\lambda$ . También se estudia la evolución del AI que produce la *PMI* máxima en función del  $\lambda$ . Adicionalmente se muestran el rendimiento indicado y el consumo específico indicado. La sección de emisiones estudia las influencias del AI y  $\lambda$  en los  $NO_x$  generados y el impacto que tiene en las prestaciones imponer un límite de  $NO_x$  en 100 ppm.

## 6.2. Ciclo abierto VS Ciclo cerrado

Atendiendo a la Tabla 5.3, se observa que para 1500@4 y  $\lambda$  2.6, se realizó un barrido del AI mucho más amplio que el resto de barridos. Este barrido corresponde al realizado durante el primer día de ensayos experimentales en CMT-Motores térmicos dedicados a este trabajo.

En dicho día, el barrido de AI se realizó desde el inicio de la fase de admisión hasta lo más cerca posible del PMS de compresión. Esto significa que se inyectó  $H_2$  tanto en ciclo abierto como en ciclo cerrado, es decir, durante la admisión y durante la compresión.

Para visualizar las fases del motor en función del ángulo de giro del cigüeñal (CAD), el ciclo abierto y cerrado y la evolución del volumen y presión en el cilindro, hay que tener presente la Figura 2.4 y la Figura 6.1. El RCA es la variable que separa el ciclo abierto (admisión) del ciclo cerrado (compresión, combustión y expansión). Es importante destacar que no hay un ángulo exacto de cierre, ya que no es instantáneo.

Para el motor de los ensayos, el RCA se sitúa aproximadamente entre  $-140^{\circ}$  y  $-130^{\circ}$  de CAD. Además, se ha de recalcar que a lo largo de este capítulo se van a utilizar con frecuencia los verbos retrasar y avanzar. **Retrasar se refiere desplazarse en dirección positiva sobre el eje de abscisas de la Figura 6.1** y **avanzar se refiere a desplazarse en dirección negativa.**

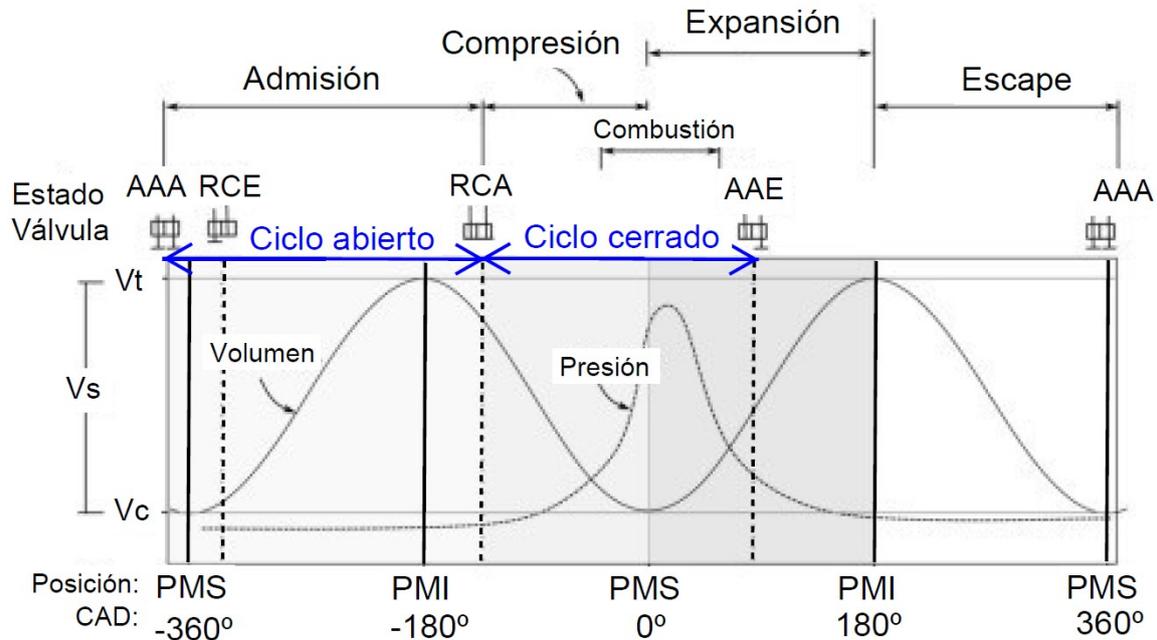


Figura 6.1: Secuencia de fases, volumen y presión en el cilindro genéricas en función del ángulo de giro del cigüeñal.

El objetivo de esta sección es analizar y describir los resultados del primer ensayo que se hizo y en base a esto justificar por que en el resto de los ensayos los barridos del AI se hicieron para ciclo cerrado solamente. A continuación se procede a analizar las prestaciones y emisiones del motor para  $1500@4$  y  $\lambda$  2.6 en función del AI.

En primer lugar, en la Figura 6.2 se representan el avance al encendido (AE) y la duración de la mezcla en función del avance de la inyección (AI). La duración de la mezcla (en CAD) sencillamente equivale a la diferencia en ángulo de giro del cigüeñal entre el momento de inyección del  $H_2$  (AI) y el momento de encendido de la mezcla (AE).

Se observa que para mantener el fasado de la combustión óptima ha sido necesario reducir el avance al encendido progresivamente en ciclo abierto, mientras que en ciclo cerrado, la reducción necesaria ha sido mas drástica excepto en el último punto, donde se ha visto necesario incrementar el AE. Esta tendencia está relacionada con la duración de la mezcla ya que es necesario disminuir el AE cuando se retrasa el AI para así darle tiempo al  $H_2$  para mezclarse correctamente. Aun así, la duración de la mezcla se observa que se reduce linealmente debido a que el retraso del AE no tiene porque se proporcional al retraso del AI.

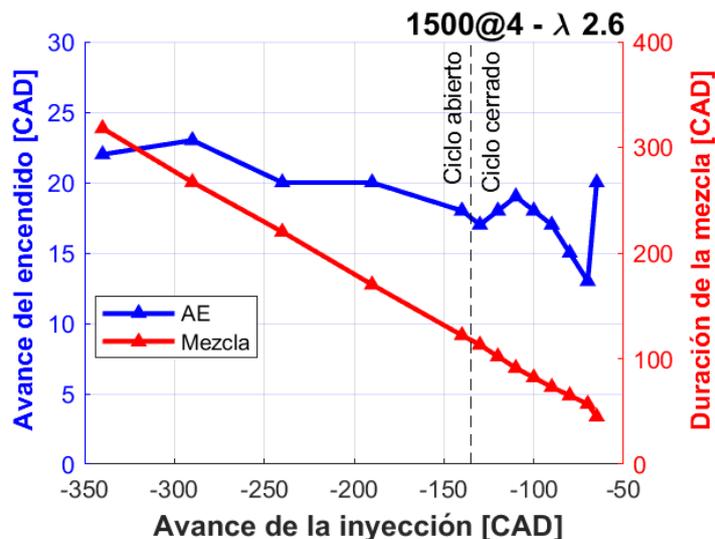


Figura 6.2: Avance del encendido y duración de la mezcla en 1500@4- $\lambda$  2.6.

En la Figura 6.3 se muestra la presión de admisión. Se observa como esta se mantiene esencialmente constante tanto en ciclo abierto y como en ciclo cerrado, pero con una diferencia de 12 % menos en ciclo cerrado. Esta reducción en la presión de admisión necesaria está relacionada con el rendimiento volumétrico del  $H_2$ . Tal y como se comentó en el Capítulo 3, en el apartado 3.4, la baja densidad del  $H_2$  limita la cantidad de aire que puede admitir el motor, ya que ocupa mucho volumen. Por lo tanto, si el  $H_2$  comprimido se inyecta en ciclo abierto, este se va a expandir rápidamente y para inyectar la cantidad de aire necesaria va a ser imperativo utilizar una mayor presión de admisión. Contrariamente, si se inyecta en ciclo cerrado, en el momento de la inyección todo el aire necesario ya se encuentra en el cilindro sin posibilidad de que la inyección del  $H_2$  lo desplace fuera, ya que las válvulas están cerradas. Por este motivo inyectar en ciclo cerrado reduce sustancialmente la presión de admisión necesaria, un 12 % en este caso.

Como se comentó en el Capítulo 5, para este motor, la presión de admisión la proporciona un compresor externo. Por este motivo lo que no hay pérdidas de presión. Lo que se consigue con la reducción en la presión de admisión es poder llegar a puntos de funcionamiento mayores (mayores  $\lambda$  por ejemplo).

En el motor policilíndrico equivalente, la presión la proporciona el compresor del motor, por lo que si hay pérdidas de presión. Una reducción en la presión de admisión necesaria supondría también menor trabajo del compresor. En el caso de que fuera turbosobrealimentado, supondría menor trabajo de la turbina pero no afectaría al rendimiento ya que la turbina obtiene la energía de los gases de escape. Si el motor fuera de sobrealimentación mecánica, el menor trabajo del compresor supondría un mayor rendimiento mecánico del motor debido a que las pérdidas por bombeo serían menores.

Respecto a la temperatura de escape, representada en la Figura 6.4 se observa que sigue una tendencia similar a la presión de admisión, que a su vez, es equivalente al patrón de la presión de escape. La temperatura se reduce alrededor de 15 °C en el intervalo entre ciclo abierto y ciclo cerrado. Esta reducción viene dada por la ecuación

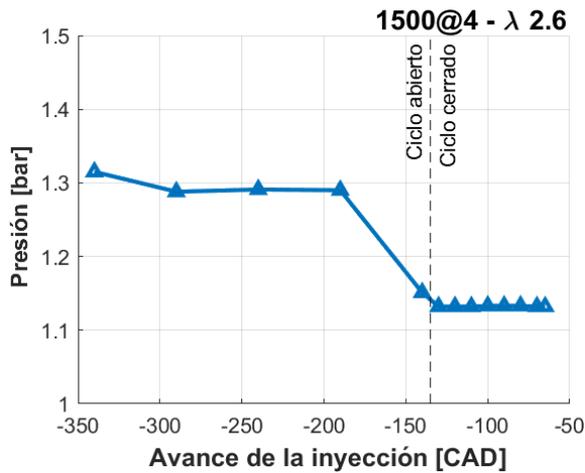


Figura 6.3: Presión de admisión en 1500@4-λ 2.6

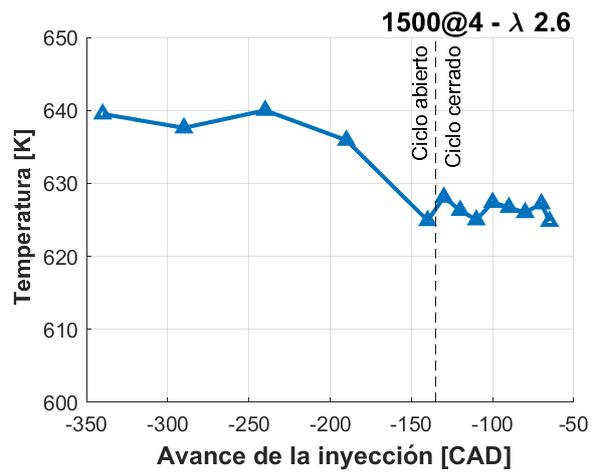


Figura 6.4: Temperatura de escape en 1500@4-λ 2.6

de estado (2.24), que relaciona la presión con la temperatura.

Para evaluar las prestaciones, en la Figura 6.5 se ha representado la presión media indicada (*PMI*) obtenida. La *PMI* varía tímidamente entre 5.15 y 5.25 en ciclo abierto mientras que en ciclo cerrado crece muy rápidamente con el retraso del AI hasta alcanzar una *PMI* de 5.43. Queda claro por tanto que las prestaciones alcanzadas en ciclo cerrado son superiores, concretamente se consigue una mejora máxima del 5% respecto al primer punto para un AI de  $-70^\circ$ . Retrasando por encima de este valor la inyección las prestaciones se reducen.

Entender el motivo por el cual crece la *PMI* en ciclo cerrado es crucial para este capítulo. En el comienzo del ciclo cerrado es cuando empieza la carrera de compresión del motor (Figura 6.1) y la compresión compone la mayor parte del trabajo negativo del motor; es una pérdida (2.4.1). Si el  $H_2$  se inyecta más tarde en la carrera de compresión, el trabajo de compresión a realizar es menor porque hay menos masa que comprimir durante la mayor parte de la carrera. Así pues, **retrasar el AI durante el ciclo cerrado reduce el trabajo de compresión y por lo tanto aumenta el rendimiento**. Al aumentar el rendimiento aumenta la *PMI*. En ciclo abierto, el retraso del AI no afecta al trabajo de compresión. La reducción en *PMI* después del máximo se da debido a que la estratificación de la mezcla ya no se realiza correctamente por el bajo tiempo de mezcla. Por debajo de  $65^\circ$ , la combustión no se produce correctamente y la dispersión es muy alta, por lo que se da por concluido el barrido

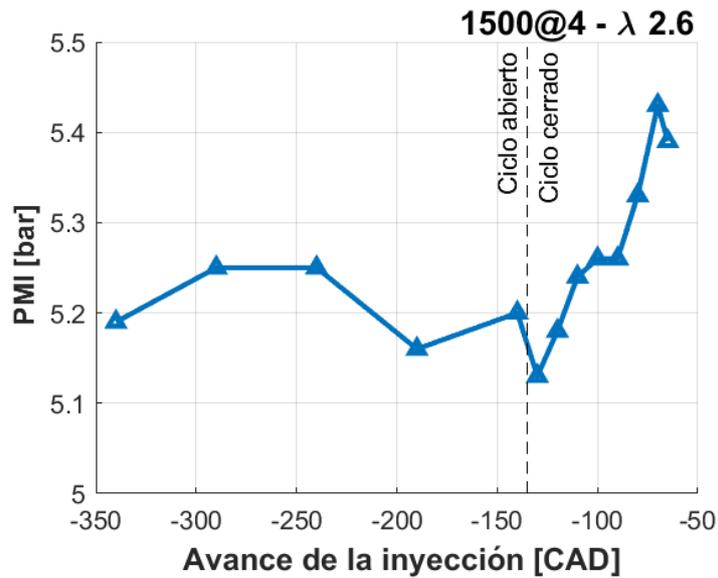


Figura 6.5: Presión media indicada en 1500@4- $\lambda$  2.6

Los  $NO_x$  (Figura 6.6) se mantienen prácticamente nulos si la inyección se realiza en cualquier momento del ciclo abierto o en el inicio del ciclo cerrado. A partir de AI  $-90^\circ$ , retrasar más la inyección supone un aumento drástico de los  $NO_x$  de hasta un 230%. Esto se debe a que, a pesar de que el  $\lambda$  global de la mezcla sea 2.6 para todos los puntos del barrido del AI, en ciclo abierto la duración de la mezcla es larga y el  $\lambda$  de la mezcla es por tanto homogéneo en el momento de encendido. Pero cuando se retrasa el AI, se reduce el tiempo de mezcla y llega un punto (a partir de AI  $-90^\circ$  en este caso) en el que la mezcla ya no es perfectamente homogénea antes del encendido y existen zonas locales de  $\lambda$  menores que generan más  $NO_x$  (Figura 3.3). La mezcla está estratificada. En la zona de  $NO_x$  máximos es donde se alcanzan  $\lambda$  locales entre 1 y 2 (Figura 3.3). Aun así, a pesar del retraso de la inyección, el máximo de  $NO_x$  apenas supera los 200 ppm.

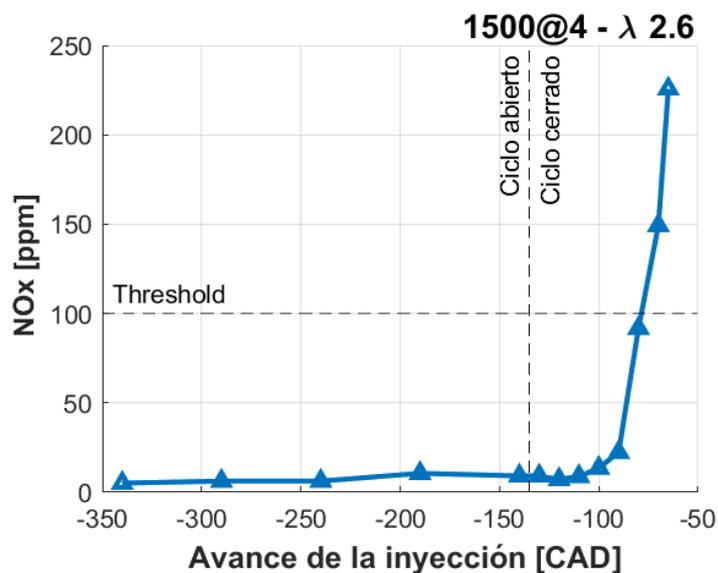


Figura 6.6:  $NO_x$  producidos en 1500@4- $\lambda$  2.6

Resumiendo, las prestaciones obtenidas inyectando en ciclo cerrado son mejores que en ciclo abierto (Figura 6.5) hasta en un 5% en comparación con el punto inicial donde la inyección se realiza pronta durante la admisión. El aumento de los  $NO_x$  con el retraso de la inyección ocurre solamente en ciclo cerrado y para AI muy retrasados. Además, la presión de admisión necesaria se reduce en un 12%, lo que permite alcanzar puntos de funcionamiento mayores (de potencialmente mayor rendimiento). En el caso de que el motor policilíndrico equivalente fuera de sobrealimentación mecánica, la inyección del  $H_2$  en ciclo cerrado supondría mayor rendimiento frente a la inyección en ciclo abierto.

Por estos motivos, en el resto de ensayos que se realizaron en el instituto CMT-Motores térmicos para este trabajo, el barrido del AI se limitó al ciclo cerrado. Para 1500@4, el barrido de la inyección se hizo a partir de valores de AI de  $-90^\circ$ , ya que es a partir de este punto cuando la  $PMI$  comienza a crecer por encima de la  $PMI$  máxima obtenida en ciclo abierto (Figura 6.5). Para 1500@7 los barridos se hicieron a partir de  $-130^\circ$ . Todo esto se resume en la Tabla 5.3.

### 6.3. Encendido y presiones en cilindro

En esta sección y en las dos posteriores se analizan los resultados del resto de ensayos realizados. Dichos ensayos se resumen en la Tabla 5.3. Para el caso de 1500@4 y  $\lambda$  2.6, se repitió el ensayo pero para un barrido del AE desde  $-90^\circ$  igual que los demás.

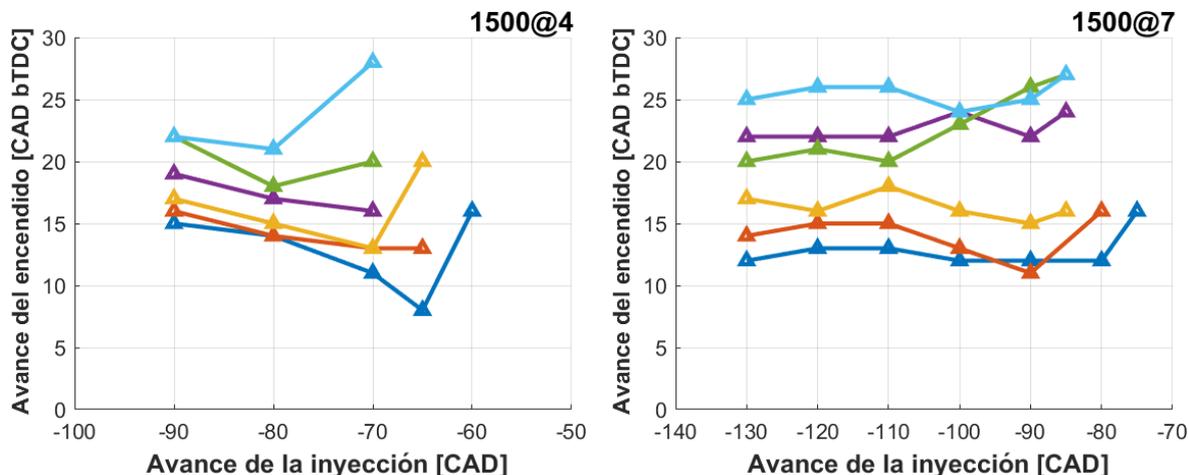


Figura 6.7: Avance al encendido  $MBT$  para cada valor del AI.

En las Figuras 6.7 y 6.8 se muestran el avance al encendido y la duración de la mezcla respectivamente, en función del AI, para 1500@4 y 1500@7. **Las unidades bTDC se refiere a *before Top Dead Center* o antes del PMS, en español.** Respecto al avance al encendido, se observa que tanto para 1500@4 como para 1500@7, cuanto más pobre es la mezcla (mayor  $\lambda$ ), más avanzado es el AE. Esto se debe a que, como se vio en la Figura 3.2, a mayor  $\lambda$ , menor es la velocidad de la llama y consecuentemente más lenta es la combustión. Por lo tanto, más avanzado debe estar el AE para que la llama se propague a tiempo hasta las paredes del cilindro.

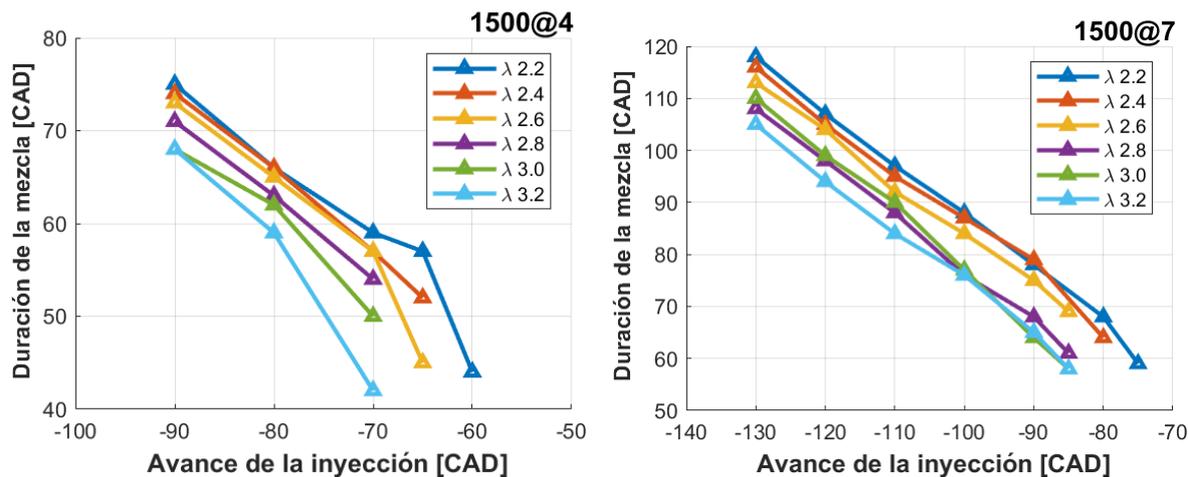


Figura 6.8: Duración de la mezcla en función del AI.

Además, conforme se retrasa la inyección, el AE *MBT* se encuentra más retrasado, aunque no de forma proporcional. Esto es así para compensar la reducción en la duración de la mezcla. Para el AI más retrasado, ocurre lo contrario y el AE *MBT* se encuentra más avanzado que el resto. Esto se debe a que para AI tan retrasados, la combustión se vuelve muy inestable y la forma de estabilizarla es avanzando el encendido.

La duración de la mezcla necesariamente se reduce con el retraso del AI. Esto se debe a que el AE *MBT* está limitado cerca del PMS de compresión, por lo tanto, por mucho que se retrase el AI, el AE no se puede retrasar en la misma proporción.

En la Figura 6.9 se muestran los resultados de la evolución de la presión media en el cilindro para todos los puntos del barrido de 1500@4. En primer lugar, se observa que tanto en la fase de compresión como en la de expansión, las curvas de presión son equivalentes para los distintos AI dentro de cada  $\lambda$ . Sin embargo, en la fase de combustión, las diferencias con la variación del AI son apreciables.

En  $\lambda 2.2$  y  $\lambda 2.4$ , se observa con claridad el comportamiento detonante del  $H_2$ . Esta observación se acentúa cuando se retrasa la inyección. Como se observa, más claramente en  $\lambda 2.2$  para AI 70, 80 y 65, cuando se retrasa el AI, la presión incrementa más rápidamente.

Con el aumento de  $\lambda$ , los efectos de la variación del AI en la presión en el cilindro se vuelven menos notables, sobretodo para  $\lambda 2.8$ . Aunque esto no se cumple en  $\lambda 3.2$ , donde la variación del AI es más notable.

Al mismo tiempo, como se observa en la Figura 6.10, a excepción de  $\lambda 2.6$  y  $2.8$ , el incremento de  $\lambda$  supone un incremento de la presión máxima obtenida, dándose la máxima para  $\lambda 3.2$  y la mínima para  $\lambda 2.2$ . La Figura también resalta que en la fase de compresión y expansión, las diferencias en la presión sí son ligeramente apreciables. Esto se debe a que, tal y como indica la Ecuación de estado (2.24), para un mismo volumen, cuanto mayor masa (o número de moles) existan dentro de dicho volumen, mayor es la presión.

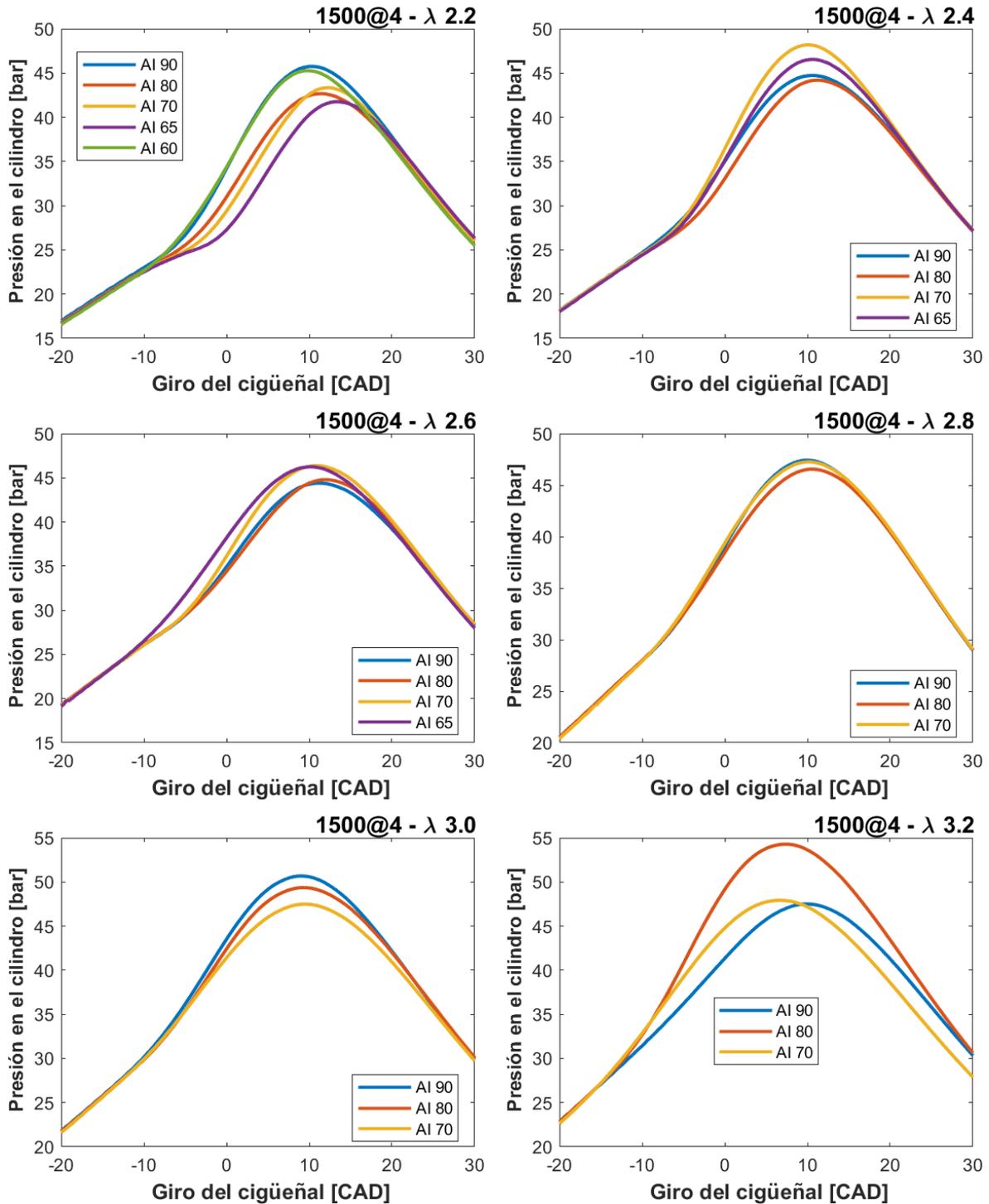


Figura 6.9: Evolución de la presión en cilindro (media de 250 ciclos) con el giro del cigüeñal para 1500@4.

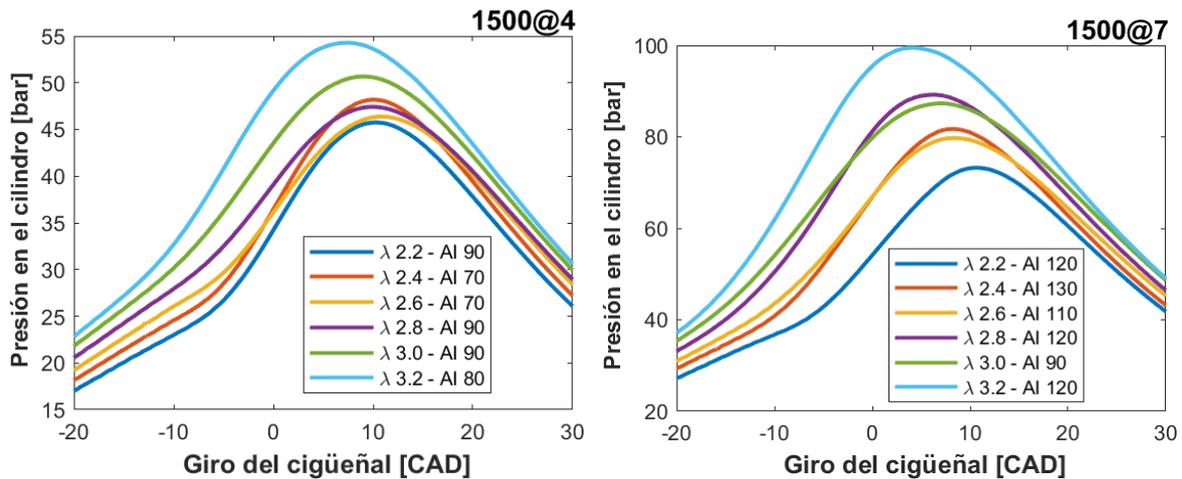


Figura 6.10: Evolución de la presión en el cilindro (media de 250 ciclos) máxima para los distintos  $\lambda$ .

En la Figura 6.11 se muestran los resultados de la evolución de la presión media en el cilindro para todos los puntos de 1500@7. Al igual que para 1500@4, las diferencias debido a la variación del AI son apreciables en la fase de combustión. Similarmente, se observa que para  $\lambda$  2.2 y 2.4, el aumento de la presión es más rápido.

En comparación con los resultados de 1500@4, se observa que la variación del AI tiene mayor efecto en la presión en el cilindro para 1500@7, especialmente con  $\lambda$  2.8 y  $\lambda$  3.2.

En la Figura 6.10 se muestran también las presiones medias máximas para los distintos  $\lambda$  y los AI en los que se dan en 1500@7. Igual que para 1500@4, un aumento en el  $\lambda$  supone una mayor presión máxima obtenida en el cilindro.

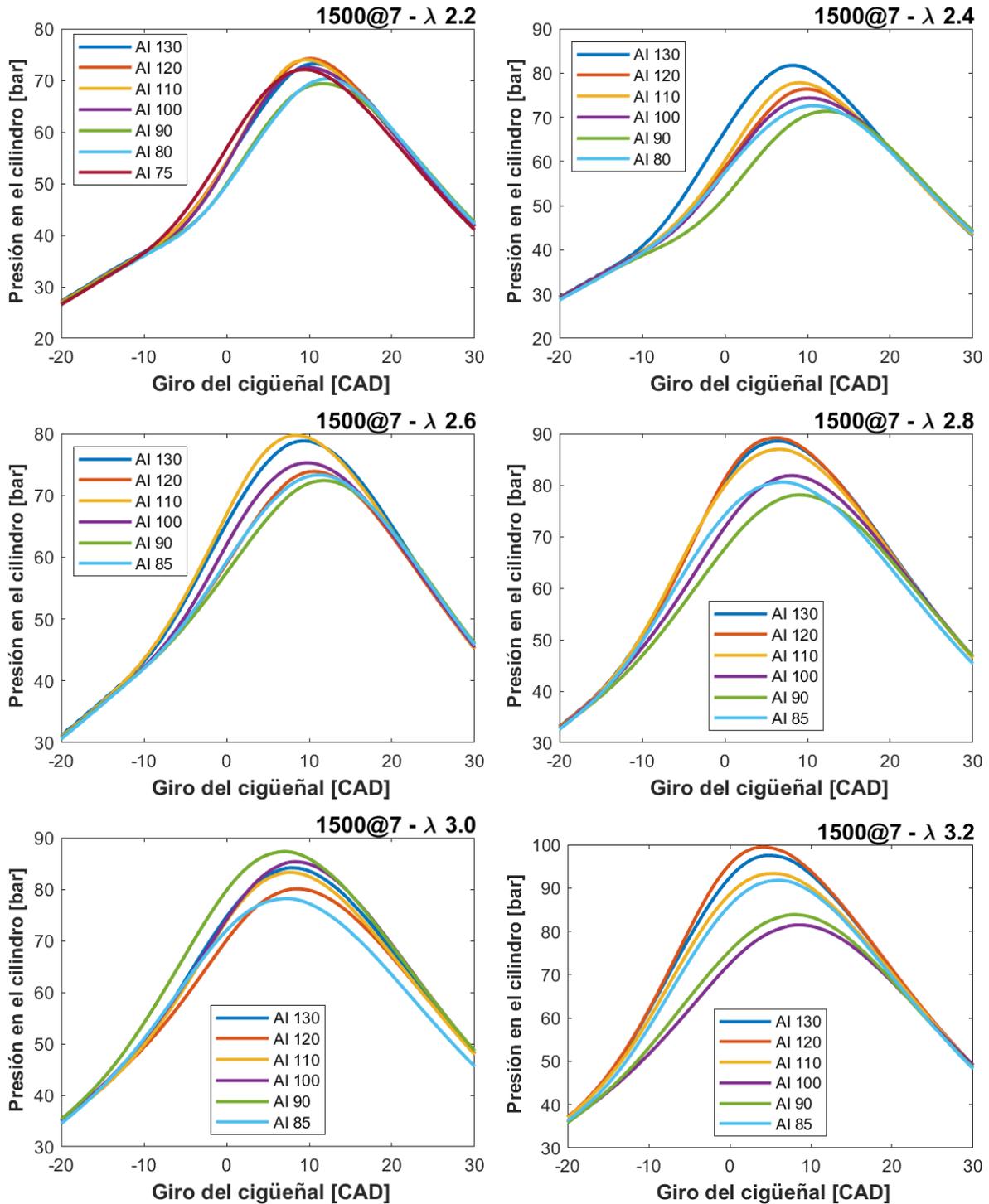


Figura 6.11: Evolución de la presión en cilindro (media de 250 ciclos) con el giro del cigüeñal para 1500@7.

## 6.4. Prestaciones

A continuación se procede a analizar las prestaciones del motor operando con hidrógeno para los puntos experimentales resumidos en las Tablas 5.2 y 5.3.

El principal parámetro utilizado para definir las prestaciones es la presión media indicada (*PMI*), que fue definida en la Ecuación 2.13. La *PMI* es un buen parámetro para evaluar las prestaciones por tres razones:

- Es independiente del tamaño del motor y por lo tanto sirve para comparar entre motores.
- Es proporcional a la potencia indicada.
- Es relativamente fácil de medir.

Adicionalmente, se ha utilizado el rendimiento indicado (o rendimiento térmico) y el consumo específico para indagar más en las prestaciones obtenidas.

En la Figura 6.12 se muestra la *PMI* obtenida en el motor para los dos puntos experimentales. En primer lugar, se observa que para los dos puntos experimentales las mejores prestaciones se obtienen para  $\lambda$  2.6 y un AI retrasado con respecto al punto inicial.

Tal y como se expuso en el Capítulo 3, el incremento del  $\lambda$  permite incrementar el coeficiente adiabático de la mezcla y por lo tanto aumenta el rendimiento térmico del motor, lo cual para una misma carga, se traduce en mayor potencia (mayor *PMI* en este caso). Además, al haber exceso de oxígeno, es más probable que todo el  $H_2$  se consiga quemar, por lo que se reducen las pérdidas por combustión incompleta. Es por esto que se alcanza mayor *PMI* para  $\lambda$  2.6 que para  $\lambda$  2.2 y 2.4. No obstante, un exceso de  $\lambda$  supone un incremento en las pérdidas por bombeo, un incremento en las pérdidas por combustión real debido a la reducción en la velocidad de la llama y una reducción en la estabilidad de la combustión. Estos tres factores, entre otros, limitan el aumento de  $\lambda$  para mejorar las prestaciones. Se ha de encontrar un punto de compromiso, es decir, un  $\lambda$  óptimo, que en este caso se da en  $\lambda$  2.6 (con AI retrasado) para los dos puntos experimentales.

La otra gran conclusión que revela la Figura 6.12 es que, para todos los  $\lambda$ , retrasar el avance de la inyección lleva a un aumento de la *PMI*. Esto se cumple hasta cierto AI retrasado, particular para cada  $\lambda$ , a partir del cual mayor retraso supone una reducción de las prestaciones. El fundamento detrás de esta mejora en las prestaciones reside en las pérdidas por inyección durante la compresión, que hacen referencia a las pérdidas por el trabajo que se realiza en la compresión dependiendo del AI. Esta idea se introdujo en la sección 6.2. **Cuanto más tarde se inyecta el  $H_2$  durante la compresión, menos trabajo de compresión debe hacer el cilindro y por lo tanto menores son las pérdidas.** La influencia del avance de la inyección y el  $\lambda$  en las pérdidas por trabajo de compresión se explican claramente en la [Figura 9 del artículo de Wimmer et al. \[48\]](#).

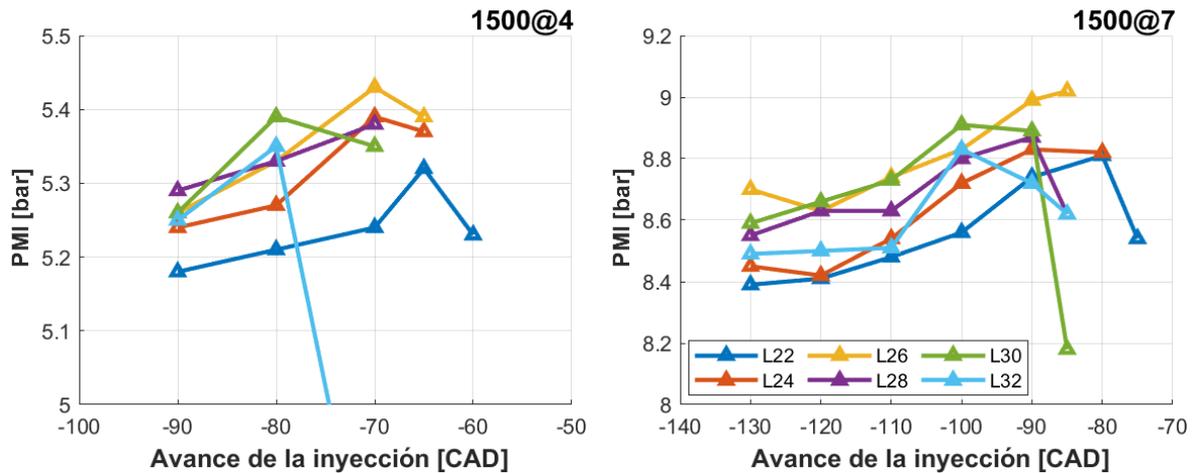


Figura 6.12: Resultados de la presión media indicada ( $PMI$ ).

Analizando de forma aislada estas pérdidas, se llega a la conclusión de que la inyección debe realizarse lo más tarde posible. Sin embargo, debido a que el AI tiene gran influencia sobre la formación de la mezcla y por lo tanto sobre el proceso de combustión, una decisión aislada considerando solamente estas pérdidas puede no resultar en un rendimiento óptimo. Es por esto que se observa en la Figura 6.12 que para cada  $\lambda$  se alcanza un máximo en  $PMI$  según se retrasa la inyección.

Cabe destacar también que el retraso en el AI resulta en una estratificación de la mezcla. Al haber poco tiempo para la homogeneización de la mezcla, esta es poco homogénea en el momento del encendido. La estratificación con zonas ricas cerca de la bujía resulta en una más corta duración de la combustión porque la velocidad de la llama para mezclas más cercanas a  $\lambda = 1$  es mayor. De esta forma, se reducen así las pérdidas por combustión real y también las pérdidas por combustión incompleta [48].

La limitación asociada al retraso del AI (a la estratificación) viene dada por una parte por las pérdidas de calor, debido a la corta duración de la combustión, estas pérdidas aumentan. Por otra parte, un AI excesivamente retrasado puede suponer que alrededor de la bujía la mezcla sea demasiado rica, muy cercana al límite de inflamabilidad, por lo que la estabilidad de la combustión se deteriora. Con mayor retraso del AI, se superara el límite de inflamabilidad y no se produce la combustión. La inestabilidad de la combustión o directamente la inhabilidad para producirse la combustión es precisamente lo que limitaba seguir retrasando la inyección en los ensayos.

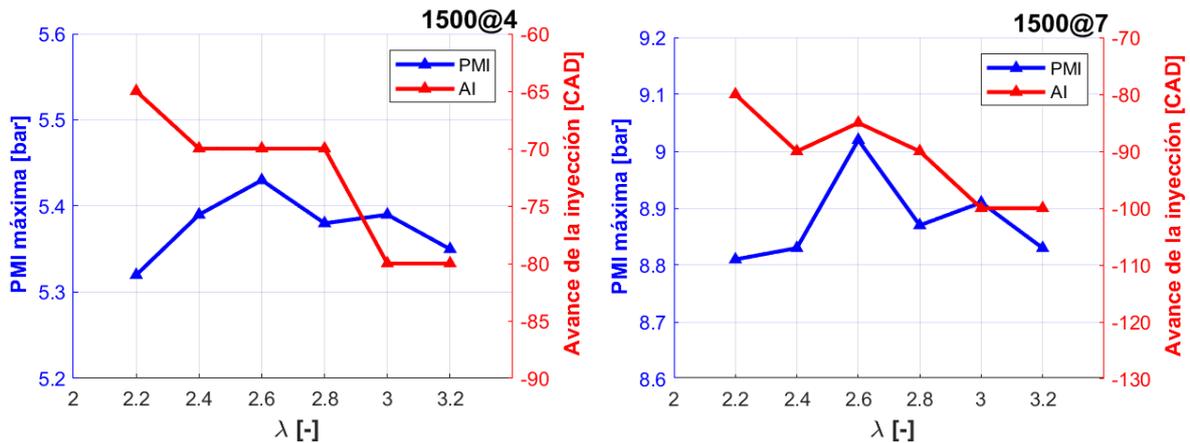


Figura 6.13: Resultados de la  $PMI$  máxima y avance a la inyección en el que se da.

En la Figura 6.13 se observa más claramente como la  $PMI$  máxima obtenida para cada  $\lambda$  crece desde  $\lambda$  2.2 hasta  $\lambda$  2.6 y lo mismo desde  $\lambda$  3.2. Para 1500@7, este óptimo es más pronunciado. Aunque lo más interesante de estos resultados es la curva del avance de la inyección (AI) en el que se da la  $PMI$  máxima. Ocurre la misma tendencia para ambos grados de carga: **a medida que aumenta el  $\lambda$ , el AI óptimo sigue una tendencia descendente, es decir, se avanza**. En el caso de 1500@4, se pasa de AI óptimo en -65 CAD hasta -80 CAD, de  $\lambda$  2.2 a  $\lambda$  3.2. Para 1500@7 se pasa de AI óptimo en -80 CAD a -100 CAD.

Esta tendencia esta directamente relacionada con la velocidad de la llama (o la velocidad de combustión). A medida que aumenta  $\lambda$ , la llama es mas lenta, así que para que esta tenga tiempo suficiente para quemar toda la mezcla y así producir una  $PMI$  óptima, el AI debe estar más adelantado.

También es interesante destacar que entre los dos grados de carga, los AI óptimos para los mismos  $\lambda$ , se diferencian en torno a 20 CAD, estando los AI óptimos de 150@7 más adelantados. Esto se debe a que hay mas masa de  $H_2$  que inyectar en 1500@7, por lo tanto la inyección ocupa mas tiempo, por lo que es necesario adelantarla para conseguir el óptimo con respecto a 1500@4.

Para visualizar concretamente cuales han sido los porcentajes de mejora asociados al retraso de avance de la inyección, se atiende a la Figura 6.14. Lo más notable de los resultados es la clara diferencia entre los dos gráficos, denotando que las mejoras obtenidas para 1500@7 han sido superiores a las obtenidas para 1500@4. Concretamente una diferencia media de 1.5 % para cada  $\lambda$ .

Esta diferencia en el % de mejoras obtenidas esta relacionado con las pérdidas por inyección durante la carrera de compresión que se han descrito anteriormente. Para un mismo  $\lambda$ , un incremento de la masa de  $H_2$  inyectada lleva a un aumento en las pérdidas por trabajo de compresión. Por esta razón, cuanto mayor es el grado de carga para un mismo  $\lambda$ , mayores mejoras pueden obtenerse de retrasar la inyección.

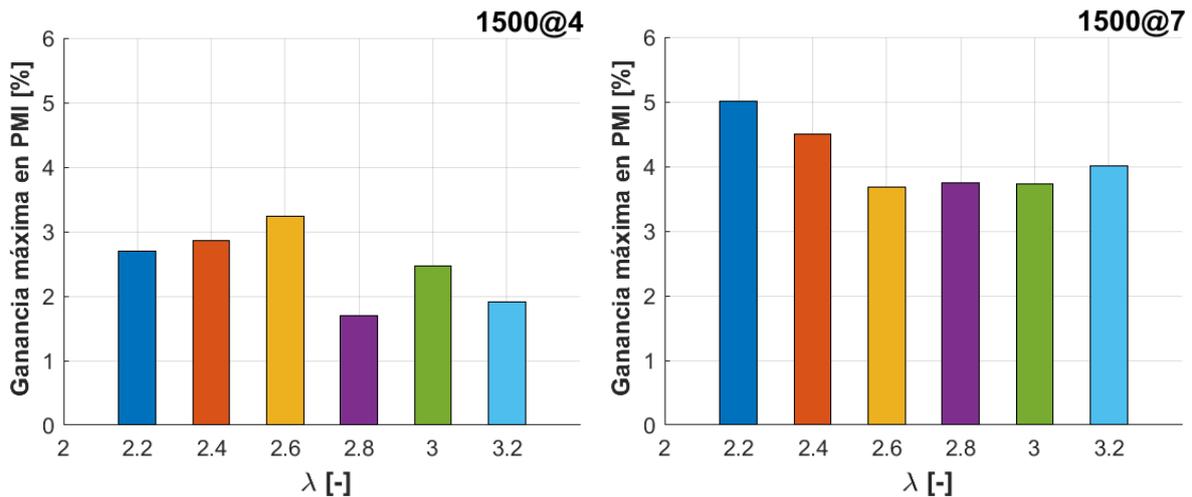


Figura 6.14: Ganancia máxima de retrasar la inyección respecto al caso de AI más adelantado.

De la Figura 6.14 también se ha de resaltar que la máxima mejora obtenida ha sido de un 5 % para  $\lambda$  2.2 en 1500@7, lo cual no es en absoluto despreciable. La mínima ha sido de 3.8 % en 1500@7 y 1.7 % en 1500@4. La máxima en 1500@4 es de un 3.2 %. En cualquier caso, para todas las configuraciones se han obtenido mejoras apreciables de retrasar la inyección.

Otro aspecto relevante que puede pasar desapercibido en la Figura 6.14 es que las mejoras con  $\lambda$  bajos (2.2 y 2.4) son en ambos casos superiores a las de  $\lambda$  altos (3 y 3.2) y que para  $\lambda$  altos los % de mejora varían muy poco (sobre todo para 1500@7). Esto es más notable en el caso de 1500@4. Esta observación nace de la teoría de que al aumentar  $\lambda$ , el % en masa del  $H_2$  con respecto al % en masa del aire, es menor. Así pues, teóricamente, a medida que se aumenta  $\lambda$ , las pérdidas por inyección en la compresión son menores y por lo tanto, las mejoras son más insensibles a la variación del AI. Además, la reducción de en las pérdidas por inyección en la compresión es cada vez menor a medida que se aumenta  $\lambda$ . Es por esto que para  $\lambda$  altos, las mejoras obtenidas son poco variables entre  $\lambda$  2.8 hasta 3.2. Esta teoría se visualiza en la Figura 9 del artículo de Wimmer et al. [48].

Las pequeñas discrepancias de la Figura 6.14 con la teoría expuesta en el párrafo anterior se debe a que, como se ha comentado anteriormente, las mejoras en las prestaciones obtenidas de retrasar la inyección no se deben únicamente a la reducción de las pérdidas por trabajo de compresión. Se deben también a la estratificación de la mezcla y los beneficios que conlleva.

En este Capítulo se ha hablado en ocasiones de rendimiento para referirse a la *PMI*. En la Figura 6.15 se muestran los resultados del rendimiento indicado obtenido para los dos puntos experimentales. Las curvas son muy similares a las de los resultados de la *PMI* de la Figura 6.12, ya que para una misma cantidad de combustible inyectado, la *PMI* es una representación tanto de la potencia como del rendimiento. Las pequeñas diferencias se deben a que la cantidad de  $H_2$  inyectado no es exactamente la misma (dentro de cada punto experimental) para todos los puntos. En la sala de ensayos, se procura mantener invariable la cantidad de combustible inyectado para un mismo grado de carga. Sin embargo, siempre existen pequeñas fluctuaciones.

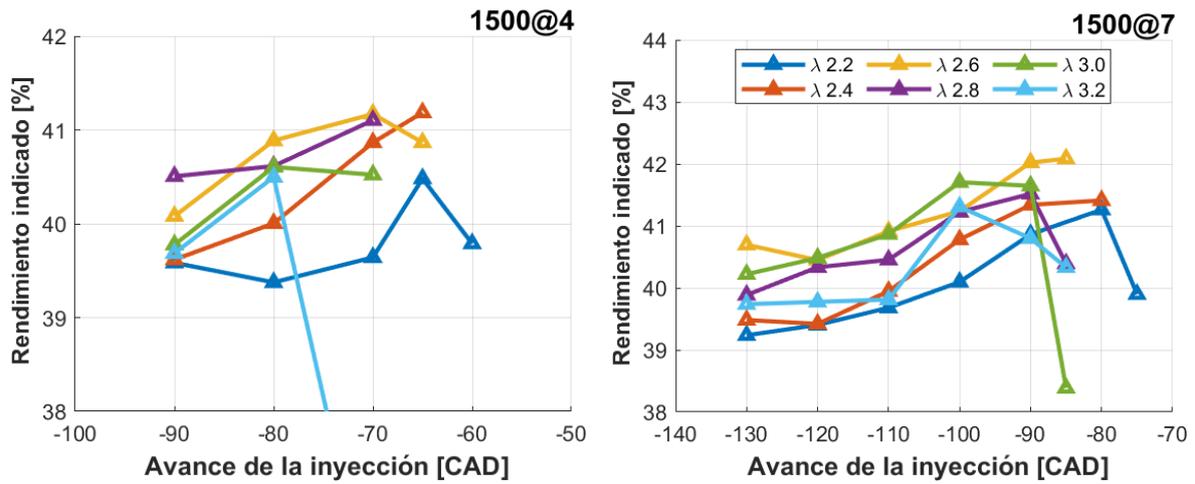


Figura 6.15: Rendimiento indicado (o rendimiento térmico) obtenido.

La Figura 6.16 resalta que los rendimientos indicados máximos obtenidos para 1500@7 son ligeramente superiores (en 1% como máximo) a los de 1500@4 en todos los casos. El rendimiento indicado máximo obtenido es de un 42.1% para 1500@7 y 41.2% para 1500@4.

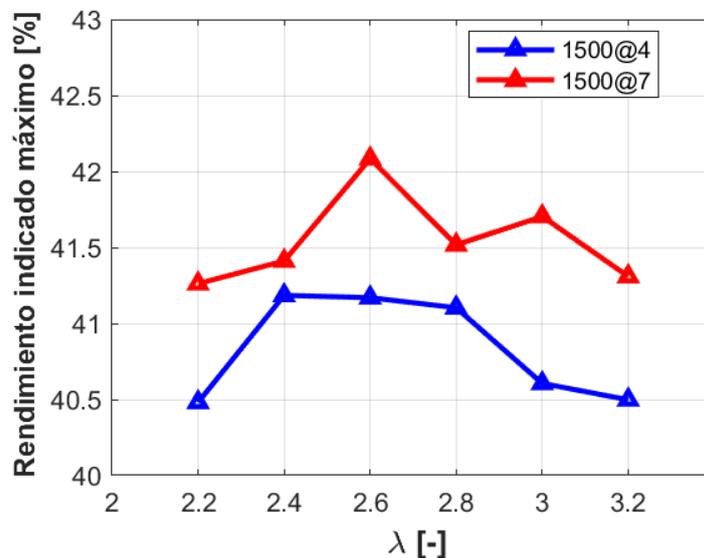


Figura 6.16: Rendimientos indicados máximos para cada  $\lambda$  y ambos puntos experimentales.

Por último, para terminar con el análisis de las prestaciones, se procede a mostrar los resultados del consumo específico indicado, Figura 6.17. Como cabía esperar, las curvas tienen exactamente la misma forma que las de rendimiento indicado (Figura 6.16) pero están invertidas ya que ambos parámetros son inversamente proporcionales (Ecuación 2.14). Se obtiene un consumo mínimo de  $H_2$  para 1500@7 de algo más de 71  $g/kWh$ .

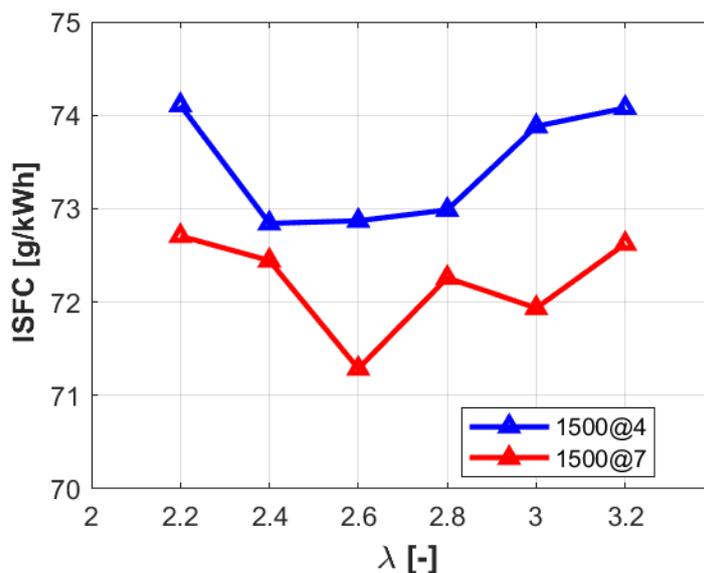


Figura 6.17: Consumo específico indicado mínimo para cada  $\lambda$  y punto de funcionamiento.

## 6.5. Emisiones

Respecto a las emisiones contaminantes, como ya se han comentado durante el trabajo, solo se han de tener en cuenta los  $NO_x$ . Debido a la ausencia de carbón en el combustible, el  $CO$  y los UHC solo se producen por la quema de lubricante del motor y dicha cantidad puede considerarse despreciable [48, 8].

La Figura 6.18 muestra los resultados de los  $NO_x$  generados en función del avance de la inyección. En dichos gráficos se ha incluido una recta horizontal en los 100  $ppm$  como límite (*Threshold*) para distinguir una emisión de  $NO_x$  casi nula de una emisión considerable.

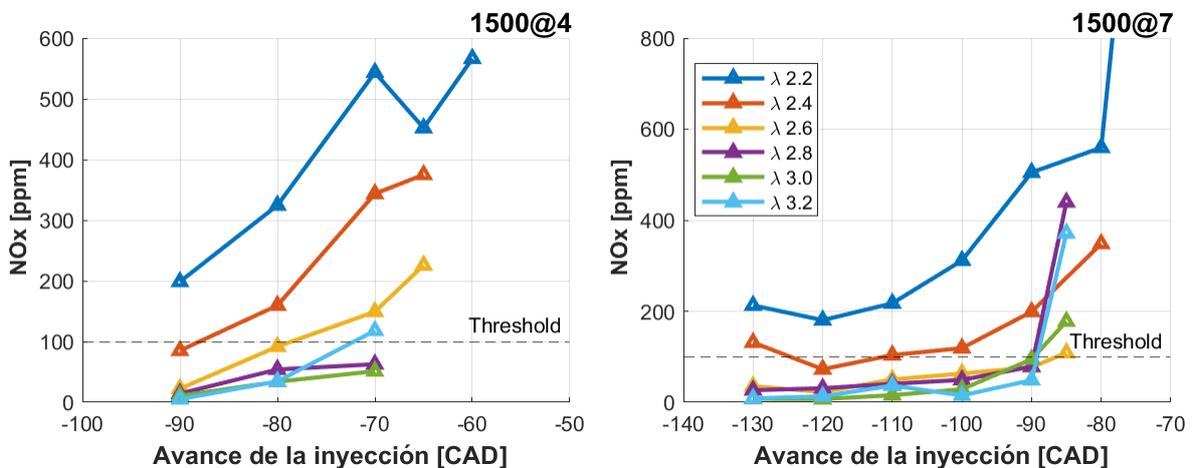


Figura 6.18: Evolución de los  $NO_x$  generados con el avance de la inyección.

Pueden hacerse tres grandes observaciones:

- A menor  $\lambda$  (dentro de los estudiados) mayor es la generación de  $NO_x$ .
- La anterior relación es poco apreciable para  $\lambda$  altos.
- Retrasar el AI resulta en mayor generación de  $NO_x$ .

A continuación se analizan cada una de estas observaciones. En primer lugar, tal y como se mostró en la Figura 3.3, la dilución de aire tiene una gran influencia sobre la generación de  $NO_x$  debido a que afecta directamente a las temperaturas alcanzadas en el cilindro. Cuanta mayor es la dilución de aire, menores son las temperaturas alcanzadas y por lo tanto menor cantidad de  $NO_x$  se genera.

A pesar de esto, es cierto que en la Figura 3.3 la cantidad de  $NO_x$  comienza a ser relevante cuando se reduce  $\lambda$  desde  $\lambda = 2$ . Por eso en los resultados de la Figura 6.18 se tiene que las cantidades no llegan ni a alcanzar 1000  $ppm$ . Así que en cualquier caso, se ha trabajado en un espectro de  $\lambda$  de baja generación de  $NO_x$ .

Otro aspecto importante de la Figura 3.3 es que esta hace referencia a mezclas homogéneas, es decir, para inyección en puerto o para inyección directa temprana, por lo cual solo puede utilizarse para analizar la Figura 6.18 si se centra en los primeros puntos (AI lo más adelantado).

Respecto a la segunda gran observación, en la Figura 6.18, para los AI tempranos, se observa que para  $\lambda = 2.8, 3.0$  y  $3.2$  en  $1500@4$  y  $\lambda = 2.6, 2.8, 3.0$  y  $3.2$  en  $1500@7$ , la diferencia entre las distintas diluciones en términos de generación de  $NO_x$  es poco apreciable. Atendiendo una vez más a la Figura 3.3, esto es lógico ya que se sitúan en la zona plana de  $NO_x$  nulos. Este comportamiento de la curva quiere decir que con estas diluciones, las temperaturas en el cilindro ya han alcanzado un mínimo (o una asíntota) por lo cual mayor dilución no supone menores temperaturas. Al mismo tiempo, se debe tener en cuenta que cuanto mayor  $\lambda$  mayor es la cantidad de aire y menor el volumen de  $NO_x$ , pero esto no quiere decir que la cantidad en masa sea menor.

También se ha de tener en cuenta que los gráficos muestran la cantidad de  $NO_x$  en *ppm*. Esta es una medida del volumen de  $NO_x$  frente al volumen total. Incrementar  $\lambda$  supone mayor volumen total. Por lo tanto, es de esperar que al incrementar  $\lambda$ , las *ppm* de  $NO_x$  se reduzcan porque se reduce el % de  $NO_x$ . Si la reducción es en mayor proporción, esto significa que la masa total de  $NO_x$  emitida es menor. Si al incrementar  $\lambda$  no hay reducción, como en el caso de  $\lambda$  altos, significa que la masa total de  $NO_x$  emitida es mayor. En cualquier caso, si los *ppm* son los mismos, la concentración de  $NO_x$  es la misma.

Lo más relevante de los resultados es la influencia del avance de la inyección sobre los  $NO_x$ . La más clara influencia es que retrasar es que retrasar la inyección resulta en un incremento de los  $NO_x$ . También es importante destacar, que cuanto menor es el  $\lambda$ , mayor es la pendiente de incremento de los  $NO_x$  con el retraso de la inyección. Cuando se retrasa la inyección, se estratifica la mezcla, no hay tiempo para la completa homogeneización de la mezcla lo que supone que se forman zonas ricas generalmente cerca de la bujía. Estas zonas ricas generan mucha más temperatura cuando se queman y en consecuencia, son fuente de mayor generación de  $NO_x$ . Es por esto que a mayor retraso del AI, mayor estratificación y mayor cantidad de  $NO_x$  emitidos. En  $1500@7$ , para un AI de  $-60$  CAD los  $NO_x$  emitidos son  $1305$  *ppm*.

Lo expuesto en el párrafo anterior es válido para los puntos experimentales ensayados, los cuales representan carga baja ( $1500@4$ ) y carga media ( $1500@7$ ). Aunque no se ha ensayado, se ha considerado importante comentar lo que sucedería con carga alta ya que curiosamente sería justo lo contrario. Para cargas altas, las mezclas bien homogéneas queman con alta emisión de  $NO_x$ . Retrasar el AI reduce considerablemente los  $NO_x$ . Al haber mayor cantidad de combustible que inyectar, apenas hay tiempo para la homogeneización de la mezcla y se crean zonas ricas y muy pobres de forma alternativa, lo cual reduce las emisiones globales de  $NO_x$  [48].

Adicionalmente, se ha detectado que, especialmente en  $1500@7$ , los súbitos picos de  $NO_x$  que se dan con el AI mas retrasado de todos, coinciden precisamente con la caída de *PMI* vista en la Figura 6.12. Esto puede deberse, entre otras cosas, a la inestabilidad de la combustión causada por la cercanía a los límites de inflamabilidad en las zonas excesivamente ricas.

Bajo el marco de minimizar los impactos ambientales por contaminación local, en la Figura 6.19 se muestran los resultados de la *PMI* máxima obtenida para cada  $\lambda$  y que genera una cantidad inferior a  $100$  *ppm*. Al mismo tiempo, en la misma figura se han comparado estos resultados con los de la Figura 6.13, que son el equivalente sin limitación de  $NO_x$ .

La normativa Euro 6 establece una límite en las emisiones de  $NO_x$  de  $80\text{ mg}/\text{km}$ , pero debido a que los ensayos se han realizado con un motor en banco y no con un vehículo, no es posible determinar las emisiones por kilómetro. Así pues, conforme a otros artículos de la literatura que también han escogido dicho límite se ha determinado un valor de  $100\text{ ppm}$  para separar emisiones considerables de emisiones prácticamente nulas.

En  $1500@4$ , se observa que desde  $\lambda$  2.2 hasta  $\lambda$  2.6, la  $PMI$  máxima ha bajado y su  $AI$  se ha adelantado. Mientras que para el resto de  $\lambda$ , la  $PMI$  se ha mantenido la misma. Esto tiene sentido ya que como se ha visto en las Figuras 6.18 y 6.12 para  $\lambda$  bajos los  $NO_x$  emitidos son mayores y retrasar la inyección aumenta los  $NO_x$  pero también aumenta la  $PMI$ . En  $1500@7$  ocurre exactamente lo mismo. En ambos puntos  $\lambda$  2.2 no aparece ya que no hay ningún valor del  $AI$  que produzca  $NO_x$  inferiores a  $100\text{ ppm}$ .

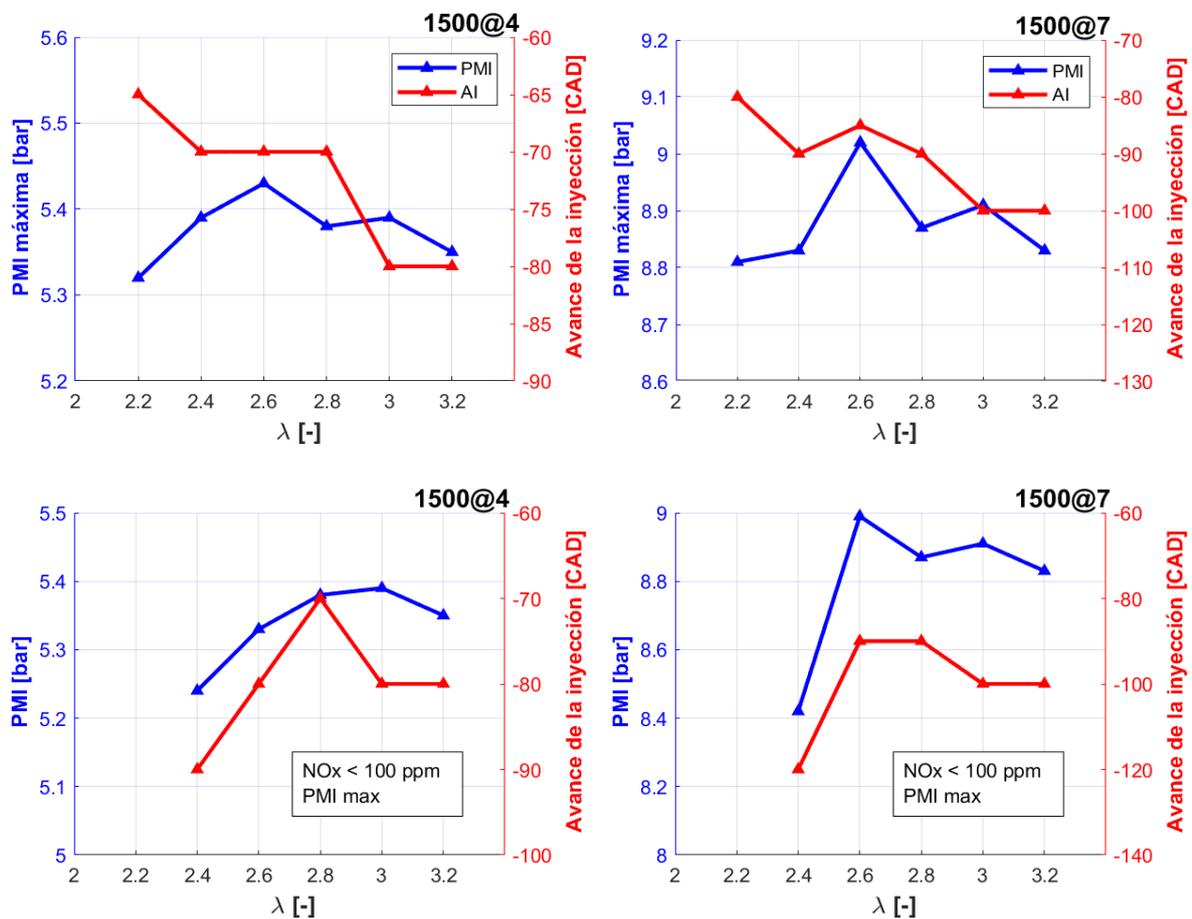


Figura 6.19: Comparación entre la  $PMI$  máxima y el  $AI$  con emisión de  $NO_x$  inferior a  $100\text{ ppm}$  y el equivalente sin limitación de  $NO_x$  (Figura 6.13).

## 6.6. Conclusiones

Los resultados de los ensayos experimentales realizados en CMT-Motores térmico sobre el estudio de inyección directa en un MEP operando con hidrógeno se han expuesto en este capítulo. Las conclusiones más relevantes que se han obtenido son las siguientes:

- La inyección directa debe hacerse al menos al inicio de la carrera de compresión. Hacerla durante el ciclo abierto requiere de una notable mayor presión de admisión que implica pérdidas de bombeo y no permite llegar a puntos de funcionamiento mayores (mayores  $\lambda$ ). Además, en comparación con la inyección en ciclo abierto, la inyección en ciclo cerrado permite alcanzar prestaciones mucho mayores. No obstante, para cargas bajas, la inyección en ciclo abierto minimiza la generación de  $NO_x$ .
- El avance al encendido (AE) *MBT* se ve influenciado por el avance de la inyección (AI) y por el  $\lambda$ . Conforme se retrasa la inyección, el AE *MBT* se encuentra más retrasado para cargas bajas, para cargas medias es más invariable. Aumentar  $\lambda$ , supone un mayor AE *MBT* para dar tiempo a que se propague la llama.
- El AI tiene gran influencia sobre las prestaciones del motor para todas las diluciones de aire ensayadas. El retraso de la inyección supone una mejora de las prestaciones, de hasta el 5% de *PMI* en los ensayos. Sin embargo, retrasar la inyección no supone una mejora automática de las prestaciones. Existe un máximo en prestaciones a partir del cual retrasar la inyección deteriora la operación del motor. También se observa que a mayor grado de carga es necesario adelantar la inyección para conseguir prestaciones óptimas.
- La dilución de aire ( $\lambda$ ) también tiene gran influencia sobre las prestaciones del motor. En los ensayos, las mejores prestaciones se han alcanzado con un  $\lambda = 2.6$  para ambos grados de carga. Se observa que las mejoras asociadas al retraso de la inyección son mayores para  $\lambda$  más bajos. Además, a medida que aumenta el  $\lambda$ , el AI óptimo sigue una tendencia descendente (se avanza).
- Las emisiones de  $NO_x$  se ven afectadas por la dilución de aire y por el retraso de la inyección. Reducir la dilución de aire supone un incremento apreciable en la generación de  $NO_x$  a partir de  $\lambda$  inferior a 2.6. Para  $\lambda$  altos (superior a 2.6) no se aprecia diferencia en la generación de  $NO_x$  con mezclas homogéneas (pronta inyección).
- Respecto al AI, para cargas bajas y medias, retrasar la inyección supone un incremento en la cantidad de  $NO_x$  emitidos. El incremento es apenas apreciable para  $\lambda$  altos excepto cuando se retrasa por encima del máximo en prestaciones.
- Imponiendo el límite de  $NO_x$  en 100 *ppm*, se reducen las máximas prestaciones desde  $\lambda$  2.2 a 2.6 pero a mayor dilución de aire las prestaciones máximas no se ven afectadas.

En la Tabla 6.1 se resumen las mejores prestaciones que se han encontrado. Estas se dan para ambos grados de carga con un  $\lambda$  igual a 2.6 (al menos en términos de  $PMI$ ). Si bien es cierto que debido a las pequeñas variaciones en la cantidad de  $H_2$  inyectado, el óptimo de rendimiento y consumo se da para  $\lambda$  2.4 y no 2.6, las diferencias son extremadamente minúsculas.

<b>Parámetro</b>	<b>1500@4</b>	<b>1500@7</b>	<b>Unidades</b>	<b><math>\lambda</math></b>	<b>AI</b>
Presión media indicada ( $PMI$ )	5.43	9.02	Bar	2.6	-70,-85
Rendimiento indicado ( $\eta_i$ )	41.2	42.1	-	2.6	-70,-85
Consumo específico indicado ( $ISFC$ )	72.8	71.3	g/kWh	2.6	-70,-85

Cuadro 6.1: Prestaciones óptimas obtenidas para cada punto experimental.

---

## 7. Conclusiones generales

---

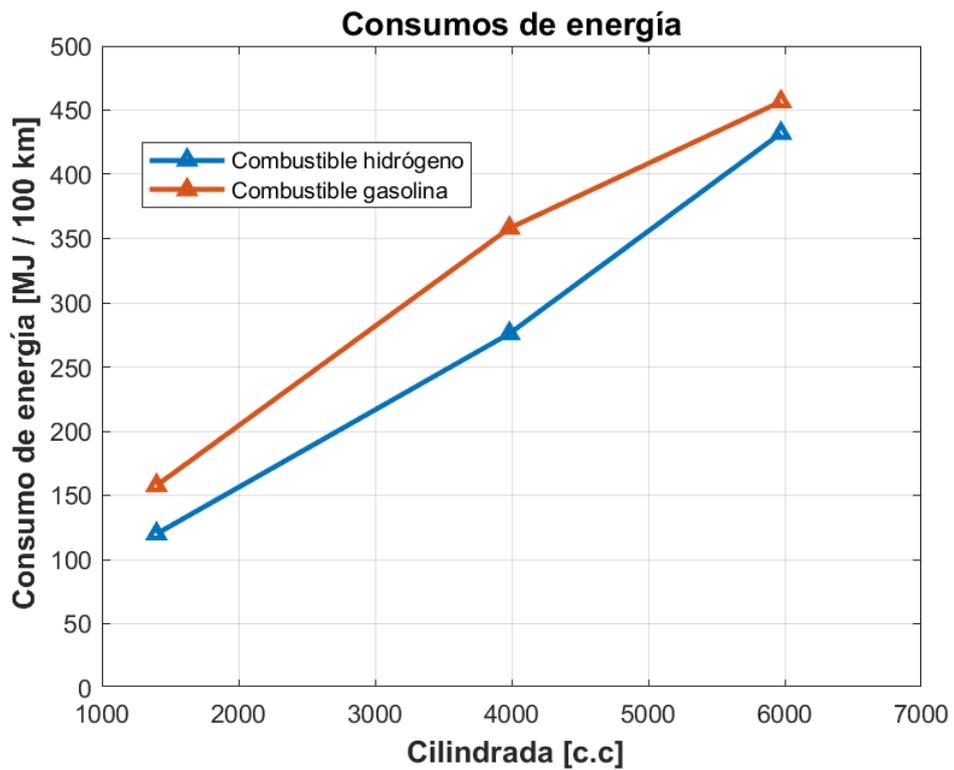
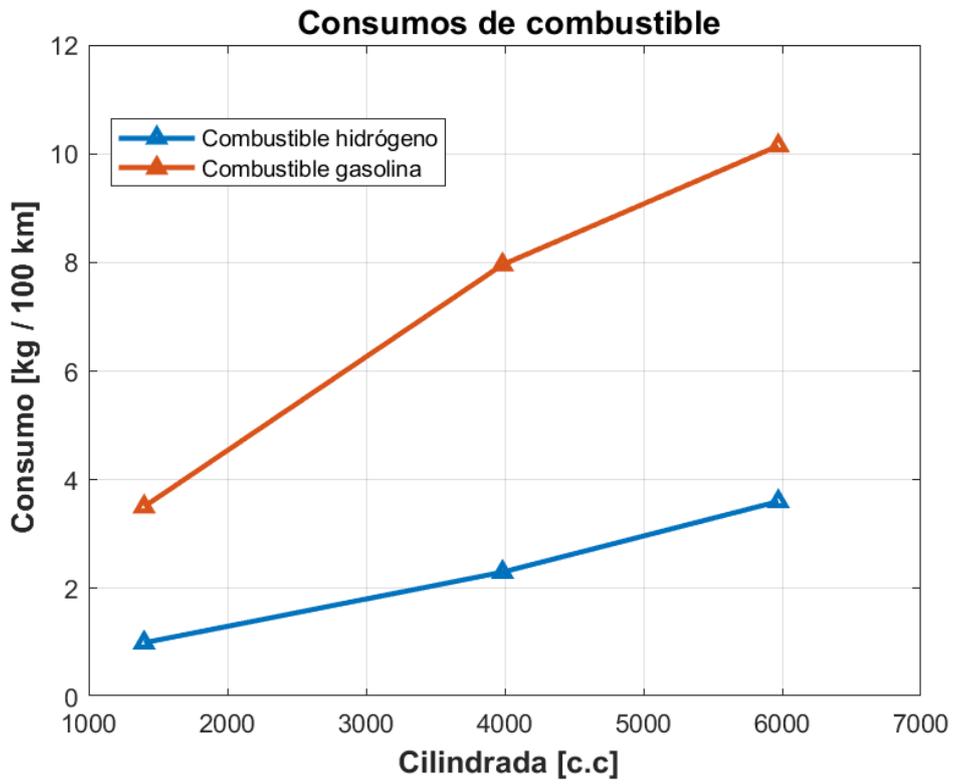
En este trabajo se ha presentado el hidrógeno como combustible en MCIA, como una vía para conseguir, en un futuro, mitigar las emisiones (principalmente de efecto invernadero) asociadas al transporte por carretera. Estas emisiones de efecto invernadero, constituían un casi un 12% del total de  $CO_{2,eq}$  en 2016. Con la implementación del  $H_2$  en los vehículos, la totalidad de dichas emisiones podría eliminarse.

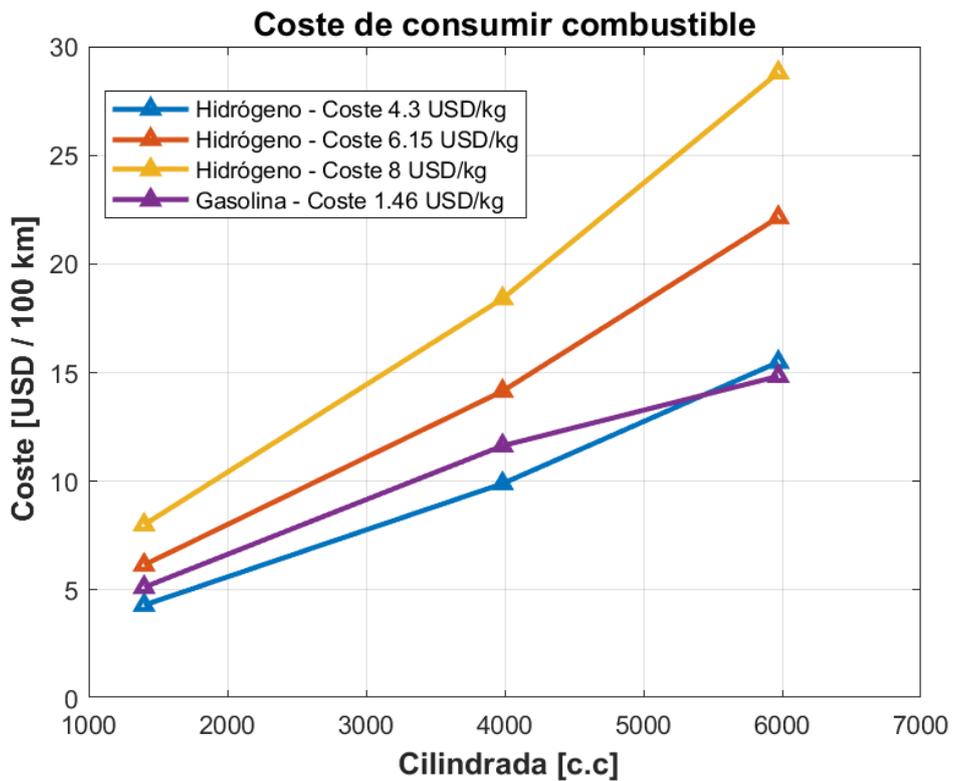
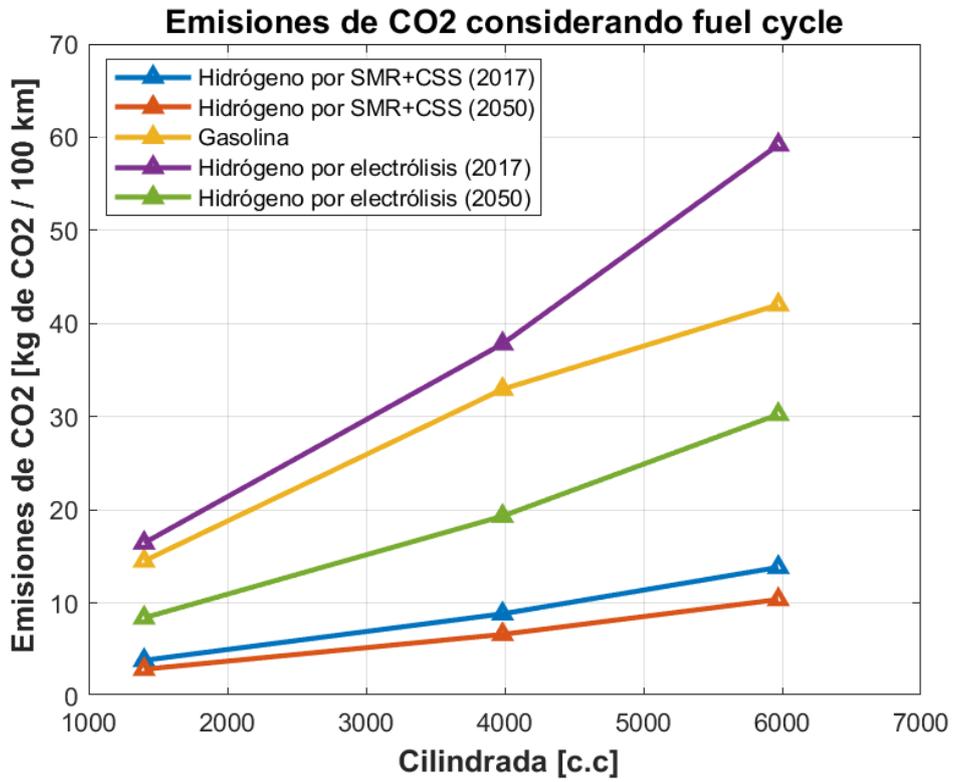
En el Capítulo 3 se han presentado las propiedades físico-químicas del  $H_2$  y la gasolina y se ha explicado como las propiedades del  $H_2$  ofrecen superioridad sobre la gasolina en términos de prestaciones y emisiones cuando se aplica en MEP. El  $H_2$  ofrece mayor potencia específica cuando está en forma de  $H_2$  criogénico y se utiliza inyección directa. También ofrece mayor rendimiento debido a la posibilidad de operar con mezclas pobres y muy pobres gracias a sus amplios límites de inflamabilidad. Esto último se traduce en menor consumo de combustible.

A pesar de estas ventajas, en el Capítulo 3 también se han expuesto las desventajas principales del  $H_2$  como combustible. La más evidente es que debido a la muy baja densidad del  $H_2$ , su integración en el vehículo requiere de tanques reforzados para soportar  $H_2$  comprimido o incluso  $H_2$  criogénico. Aun así, la capacidad que puede almacenarse es más limitada que con gasolina y por lo tanto el alcance del vehículo también está más limitado. Los otros inconvenientes presentados están relacionados con mayor facilidad para ocurrir y mayor gravedad de las consecuencias cuando se dan los fenómenos de combustión anormal: retroceso de la llama, pre-ignición y knock.

El Capítulo 4 junto con el Capítulo 6 y con el apoyo del Capítulo 3, son los más importantes de todo el trabajo. En el número 4, Transición al hidrógeno, se han llevado a cabo diversas tareas. Se han expuesto los principales métodos de producción y distribución del  $H_2$ . Se ha hecho una introducción a los Mix energéticos, resaltando su relevancia y mostrando la situación actual y la prevista. Posteriormente, se han realizado dos estudios bibliográficos. El primero sobre las emisiones de  $CO_{2,eq}$  asociadas a la producción y distribución del  $H_2$ , comparando así los distintos métodos expuestos al inicio del capítulo. El segundo relacionado con los costes asociados a los mismos procesos, para tener una visión económica sobre el reto que supone la transición al hidrógeno y como unos métodos pueden ser más favorables en términos de emisiones pero al mismo tiempo menos asequibles en términos económicos. Para repasar todas las conclusiones obtenidas sobre lo mencionado en este párrafo, realice la lectura de la sección 4.6 del Capítulo 4.

A partir de los estudios bibliográficos, de búsqueda de información sobre vehículos reales operando con  $H_2$  y/o gasolina (Tabla 4.1) y de búsqueda de información adicional como costes y previsión de costes de la gasolina, en el Capítulo 4 se ha realizado una gran aportación a la literatura relacionada con las emisiones y los costes de operar un vehículo de  $H_2$ . Esta aportación es quizás lo más relevante del trabajo por la información que revela, la claridad con la que lo hace y la relevancia de dicha información. Dicha aportación está compuesta de cuatro gráficos que se muestran en las Figuras 4.10, 4.11 y las más importantes las Figuras 4.12 y 4.15.





Dichas figuras se han mostrado una vez más debido a su relevancia en el trabajo. Para repasar toda las conclusiones que se obtienen de dichos gráficos, se invita a repasar de nuevo las conclusiones del Capítulo 4, concretamente el apartado 4.6.4.

En el instituto CMT-Motores térmicos, a lo largo de los primeros meses de 2022, se realizaron ensayos experimentales en un motor de encendido provocado de inyección directa operando con  $H_2$  como combustible. El procedimiento experimental de dichos ensayos se ha descrito en el Capítulo 5. Las variables importantes son la relación aire combustible relativa ( $\lambda$ ) y el avance de la inyección (AI). El plan de ensayos se resume en las Tablas 5.2 y 5.3.

El análisis de los resultados de los ensayos experimentales compone el Capítulo 6. Las conclusiones más importantes son, por una parte, que la posibilidad de variar el AI con la inyección directa permite poder optimizar el motor para cualquier grado de carga, bien para maximizar la potencia o para minimizar las emisiones de  $NO_x$ . Por otra parte, que la dilución de aire en mezclas pobres es un método clave para reducir las emisiones de  $NO_x$  (con mayor dilución) y además sirve para optimizar el rendimiento del motor para cargas bajas y parciales. Las mejores prestaciones obtenidas de los ensayos se resumen en la Tabla 6.1 y se muestran una vez más como punto y final de este trabajo de fin de grado.

<b>Parámetro</b>	<b>1500@4</b>	<b>1500@7</b>	<b>Unidades</b>	$\lambda$	<b>AI</b>
Presión media indicada ( $PMI$ )	5.43	9.02	Bar	2.6	-70,-85
Rendimiento indicado ( $\eta_i$ )	41.2	42.1	-	2.6	-70,-85
Consumo específico indicado ( $ISFC$ )	72.8	71.3	g/kWh	2.6	-70,-85

---

## 8. Bibliografía

---

- [1] Canan Acar and Ibrahim Dincer. Comparative environmental impact evaluation of hydrogen production methods from renewable and nonrenewable sources, 2013.
- [2] Canan Acar and Ibrahim Dincer. Hydrogen production, 2 2018.
- [3] U.S Energy Information Administration. Annual energy outlook 2022, 2021. URL <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/energy-balances>.
- [4] European Environment agency. Sector share of nitrogen oxides emissions, 2018. URL [https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/sector-share-of-nitrogen-oxides-emissions#tab-chart\\_1](https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/sector-share-of-nitrogen-oxides-emissions#tab-chart_1).
- [5] Iván Garijo Fernández Bernardo Tormos Martínez Santiago Molina Alcaide. Universitat politÈcnica de valÈncia contenido, 2019.
- [6] U.S DEPARTMENT OF ENERGY Alternative Fuels Data Center. Hydrogen production and distribution, 2022. URL [https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen\\_production.html](https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen_production.html).
- [7] Nicolae Apostolescu and Radu Chiriac. A study of combustion of hydrogen-enriched gasoline in a spark ignition engine, 2018.
- [8] M Berckmüller, H Rottengruber, A Eder, N Brehm, G Elsässer, G Müller-Alander, and C Schwarz. Potentials of a charged si-hydrogen engine. ISSN 0148-7191.
- [9] Ramchandra Bhandari, Clemens A. Trudewind, and Petra Zapp. Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis - a review, 12 2014. ISSN 09596526.
- [10] D Bradley, R A Hicks, M Lawes, C G W Sheppard, and R Woolley. The measurement of laminar burning velocities and markstein numbers for iso-octane-air and iso-octane-n-heptane-air mixtures at elevated temperatures and pressures in an explosion bomb, 1998.
- [11] Jesus Vicente Benajes Calvo. *Programa de teoría de la asignatura de motores alternativos*. Universidad Politécnica de Valencia”, Universidad Politécnica de Valencia, 2021.
- [12] Natural Resources Canada. Learn the facts: Fuel consumption and co 2. URL [www.4cleanair.org](http://www.4cleanair.org).
- [13] E. Cetinkaya, I. Dincer, and G. F. Naterer. Life cycle assessment of various hydrogen production methods. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37:2071–2080, 2 2012. ISSN 03603199. doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.10.064.
- [14] European Comission. Eurostat, energy balances, 2017. URL <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/energy-balances>.

- [15] Peter A. Dennis, Robert J. Dingli, Payman Abbasi Atibeh, Harry C. Watson, Michael J. Brear, and Glen Voice. Performance of a port fuel injected, spark ignition engine optimised for hydrogen fuel. SAE International, 2012. doi: 10.4271/2012-01-0654.
- [16] J. M. Desantes, S. Molina, R. Novella, and M. Lopez-Juarez. Comparative global warming impact and nox emissions of conventional and hydrogen automotive propulsion systems. *Energy Conversion and Management*, 221, 10 2020. ISSN 01968904. doi: 10.1016/j.enconman.2020.113137.
- [17] DIARIOMOTOR. ¿qué es la distribución variable y para qué sirve? vanos, valvetronic, variocam, multiair, vtec... conoce cómo funcionan, 2020. URL <https://www.diariomotor.com/que-es/mecanica/distribucion-variable/>.
- [18] US DOE Energy Systems Division. Technology assessment of a fuel cell vehicle: 2017 toyota mirai energy systems division,, 2017. URL <https://www.anl.gov/>.
- [19] Robert Edwards, Simon Godwin, Heather Hamje, Alois Krasenbrink, Laura Lonza, Robin Nelson, Alan Reid, and Kenneth D Rose. Tank-to-wheels report-version 4.a well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the european context. 2014. doi: 10.2790/95839.
- [20] Helmut Eichlseder, Thomas Wallner, Raymond Freymann, and Jürgen Ringler. The potential of hydrogen internal combustion engines in a future mobility scenario. 2003. ISSN 0148-7191.
- [21] Wolfram Enke, Manfred Gruber, Ludwig Hecht, and Bernhard Staar. The bi-fuel v12 engine of the new bmw hydrogen 7 authors.
- [22] Belgium European Commission: Brussels. A hydrogen strategy for a climate-neutral europe, 2020. URL <https://www.h2greentech.eu/a-hydrogen-strategy-for-a-climate-neutral-europe/#:~:text=The%20EU%20Hydrogen%20Strategy%20will,the%20EU's%20greenhouse%20gas%20emissions.>
- [23] H. Fayaz, R. Saidur, N. Razali, F. S. Anuar, A. R. Saleman, and M. R. Islam. An overview of hydrogen as a vehicle fuel, 10 2012. ISSN 13640321.
- [24] European Commission. Directorate-General for Energy., European Commission. Climate Action DG., European Commission. Directorate General for Mobility, and Transport. *Energy, transport and GHG emissions, trends to 2050 : EU reference scenario 2016*. EUR-OP, 2016. ISBN 9789279523731.
- [25] Francisco. Payri González and José María. Desantes Fernández. *Motores de combustión interna alternativos*. Universitat Politècnica de Valencia, 2011. ISBN 9788483637050.
- [26] John B. Heywood. *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill, 1988. ISBN 007028637X.

- [27] Xing hua Liu, Fu shui Liu, Lei Zhou, Bai gang Sun, and Harold J. Schock. Backfire prediction in a manifold injection hydrogen internal combustion engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33:3847–3855, 7 2008. ISSN 03603199. doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.04.051.
- [28] Akinori Ichikawa, Akihiro Hayakawa, Yuichi Kitagawa, Taku Kudo, and Hideaki Kobayashi. Laminar burning velocity and markstein length of ammonia/hydrogen/air premixed flames at elevated pressures, 2015. URL <http://www.elsevier.com/open-access/userlicense/1.0/2>.
- [29] Iea. Carbon capture and storage 2013 edition, 2035. URL [www.iea.org](http://www.iea.org).
- [30] Agencia internacional de la energía. Demanda de energía mundial, 2016. URL <https://www.iea.org/>.
- [31] C. Koroneos, A. Dompros, G. Roumbas, and N. Moussiopoulos. Life cycle assessment of hydrogen fuel production processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29:1443–1450, 11 2004. ISSN 03603199. doi: 10.1016/j.ijhydene.2004.01.016.
- [32] David Lampert, Hao Cai, and May Wu. Development of a life cycle inventory of water consumption associated with the production of transportation fuels 2016 billion-ton report view project alternative jet fuels view project. 2015. doi: 10.13140/RG.2.1.3886.9201. URL <https://www.researchgate.net/publication/283014981>.
- [33] Xianming Jimmy Li, Jeffrey D. Allen, Jerad A. Stager, and Anthony Y. Ku. Paths to low-cost hydrogen energy at a scale for transportation applications in the usa and china via liquid-hydrogen distribution networks, 4 2020. ISSN 2515396X.
- [34] Zixuan Luo, Yang Hu, Huachi Xu, Danhui Gao, and Wenying Li. Cost-economic analysis of hydrogen for china’s fuel cell transportation field. *Energies*, 13, 12 2020. ISSN 19961073. doi: 10.3390/en13246522.
- [35] Generalitat Valenciana Mestrea @ Casa. 2. motores térmicos, 2022. URL [https://mestreacasa.gva.es/c/document\\_library/get\\_file?folderId=500002517593&name=DLFE-194566.pdf](https://mestreacasa.gva.es/c/document_library/get_file?folderId=500002517593&name=DLFE-194566.pdf).
- [36] N. Z. Muradov and T. N. Veziroğlu. From hydrocarbon to hydrogen-carbon to hydrogen economy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30:225–237, 3 2005. ISSN 03603199. doi: 10.1016/j.ijhydene.2004.03.033.
- [37] OFFICE of ENERGY EFFICIENCY and RENEWABLE ENERGY. Cheap gas could delay america’s efficiency targets for cars and trucks, 2016. URL <https://theconversation.com/cheap-gas-could-delay-americas-efficiency-targets-for-cars-and-trucks-56482#:~:text=EIA%20has%20revised%20its%20forecasts,2020%20and%20%243.20%20in%202030>.
- [38] OFFICE of ENERGY EFFICIENCY and RENEWABLE ENERGY. Doe h2a production analysis, 2022. URL [https://www.hydrogen.energy.gov/h2a\\_production.html](https://www.hydrogen.energy.gov/h2a_production.html).

- [39] Krishna Reddi, Marianne Mintz, Amgad Elgowainy, and Erika Sutherland. 35 challenges and opportunities of hydrogen delivery via pipeline, tube-trailer, liquid tanker and methanation-natural gas grid.
- [40] RTVE. La dependencia del gas ruso de europa y españa: ¿cuáles son las alternativas?, 2022. URL <https://www.rtve.es/noticias/20220427/dependencia-gas-ruso-europa-espana/2297085.shtml#:~:text=Rusia%20exporta%2C%20seg%C3%BAn%20Reuters%2C%206,su%20gas%20al%20mismo%20nivel>.
- [41] K. V. Shivaprasad, R. Rajesh, W. Anteneh Wogasso, B. Nigatu, and F. Addisu. Usage of hydrogen as a fuel in spark ignition engine. volume 376. Institute of Physics Publishing, 6 2018. doi: 10.1088/1757-899X/376/1/012037.
- [42] M. A. Escalante Soberanis and A. M. Fernandez. A review on the technical adaptations for internal combustion engines to operate with gas/hydrogen mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35:12134–12140, 2010. ISSN 03603199. doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.09.070.
- [43] V. Subramanian, J. M. Mallikarjuna, and A. Ramesh. Effect of water injection and spark timing on the nitric oxide emission and combustion parameters of a hydrogen fuelled spark ignition engine, 6 2007. ISSN 03603199.
- [44] D. Sáinz, P. M. Diéguez, C. Sopena, J. C. Urroz, and L. M. Gandía. Conversion of a commercial gasoline vehicle to run bi-fuel (hydrogen-gasoline). *International Journal of Hydrogen Energy*, 37:1781–1789, 1 2012. ISSN 03603199. doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.10.046.
- [45] S. Verhelst, P. Maesschalck, N. Rombaut, and R. Sierens. Efficiency comparison between hydrogen and gasoline, on a bi-fuel hydrogen/gasoline engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34:2504–2510, 3 2009. ISSN 03603199. doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.01.009.
- [46] Sebastian Verhelst, Joachim Demuyne, Roger Sierens, Riccardo Scarcelli, Nicholas S. Matthias, and Thomas Wallner. Update on the progress of hydrogen-fueled internal combustion engines, 2013.
- [47] Wikipedia. Comercio de derechos de emisión, 2022. URL [https://es.wikipedia.org/wiki/Comercio\\_de\\_derechos\\_de\\_emisi%C3%B3n](https://es.wikipedia.org/wiki/Comercio_de_derechos_de_emisi%C3%B3n).
- [48] Andreas Wimmer, Thomas Wallner, Jürgen Ringler, and Falk Gerbig. H<sub>2</sub>-direct injection-a highly promising combustion concept h<sub>2</sub>-direct injection-a highly promising combustion concept. ISSN 0148-7191.
- [49] Our world in data. Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from?, 2022. URL <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>.

---

## 9. Pliego de condiciones

---

### 9.1. Condiciones generales

En esta sección se hará referencia a la condiciones generales requeridas en la sala de ensayos. Las siguientes especificaciones deben cumplirse:

#### **Condiciones de realización de los ensayos**

Se entiende por ensayo del motor, el espacio de tiempo en que este está funcionando y durante el cual se adquieren, a través de los sistemas de medida, datos sobre las condiciones de operación, prestaciones y emisiones de contaminantes para su posterior tratamiento y estudio. Antes y durante este proceso se deben tener en cuenta la normativa que asegura la validez de los ensayos y integridad de los equipos.

#### **Validez de los ensayos**

Para asegurar la validez de los ensayos realizados, se deberá esperar un tiempo prudencial tras poner en marcha el motor permitiendo el calentamiento de este.

Se deberá ajustar, en la medida de lo posible, a las condiciones impuestas como la de presión de admisión, escape, temperatura de admisión y caudales de combustible.

Se ha de asegurar el correcto funcionamiento del medidor de contaminantes Horiba vigilando la limpieza de los filtros. En caso de que no sea así, estos deberán ser cambiados.

#### **Integridad de los equipos**

Algunas de las indicaciones que permiten preservar la integridad de los equipos se presentan a continuación.

Primeramente, antes de poner en funcionamiento el motor, de deberá comprobar que la instalación se encuentre preparada para ello. Una vez se arranca el motor, el acercamiento a las condiciones de ensayo se debe realizar de forma gradual en cuanto a la cantidad de combustible inyectado.

Durante los ensayos se debe asegurar el funcionamiento de lubricación y refrigeración. Asimismo, se deberá vigilar de forma periódica el estado de los elementos de la instalación.

### 9.2. Marco legal

En el marco legal, el Real Decreto 486/1997 del 14 de Abril establece las ordenanzas de seguridad, higiene y salud que aplican las disposiciones del artículo 6 de la Ley 31/1995 del 8 de noviembre sobre prevención de Riesgos Laborales. No obstante, debido a la pandemia de COVID-19 acontecida en el año 2020, se publicó el Real Decreto-ley 28/2020 de trabajo a distancia el 23 de Septiembre de 2020 en el Boletín Oficial del Estado.

### 9.2.1. Real Decreto 488/1997 de 14 de abril

Citando textualmente: 'La Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales, determina el cuerpo básico de garantías y responsabilidades preciso para establecer un adecuado nivel de protección de la salud de los trabajadores frente a los riesgos derivados de las condiciones de trabajo, en el marco de una política coherente, coordinada y eficaz. Según el artículo 6 de la misma serán las normas reglamentarias las que irán fijando y concretando los aspectos más técnicos de las medidas preventivas.'

'Así, son las normas de desarrollo reglamentario las que deben fijar las medidas mínimas que deben adoptarse para la adecuada protección de los trabajadores. Entre ellas se encuentran las destinadas a garantizar que de la utilización de los equipos que incluyen pantallas de visualización por los trabajadores no se deriven riesgos para la seguridad y salud de los mismos.'

Se incluyen artículos referentes a las obligaciones de los empresarios frente a los trabajadores, a la vigilancia de la salud de los trabajadores y al derecho de formación y de obtención de materia de formación de estos.

### 9.2.2. Real Decreto-ley 28/2020

Este decreto recoge aspectos preventivos relacionados con la fatiga física y mental, el uso de pantallas de visualización de datos y los riesgos de aislamiento. Citando textualmente, 'El objeto del Acuerdo era elaborar un marco general a escala europea sobre las condiciones laborales de teletrabajadoras y teletrabajadores y compaginar las necesidades de flexibilidad y seguridad que son comunes a estos y a las empresas. El Acuerdo otorga a las personas trabajadoras a distancia la misma protección global que a las que ejercen sus actividades en los locales de la empresa. En dicho Acuerdo se define el teletrabajo como una forma de organización o de realización del trabajo utilizando las tecnologías de la información, en el marco de un contrato o de una relación laboral, en la que un trabajo que también habría podido realizarse en los locales de la empresa, se ejecuta habitualmente fuera de estos.'

A continuación se pasa al estudio de algunos artículos de interés:

#### **Artículo 1. Ámbito de aplicación**

Establece que el trabajo a distancia regular debe tener como mínimo una referencia de tres meses con un 30 % de la jornada.

#### **Artículo 11. Derecho a la dotación suficiente y mantenimiento de medios, equipos y herramientas**

Toda persona que trabaje a distancia tendrá el derecho a la dotación y mantenimiento de los medios, equipos y herramientas necesarias para el desarrollo del trabajo por parte de la empresa. En caso de dificultades técnicas, se debe garantizar la atención precisa al trabajador.

#### **Artículo 13. Derecho al horario flexible en los términos del acuerdo**

Se deberán respetar los tiempos de disponibilidad obligatoria y la normativa sobre el tiempo de trabajo y descanso.

**Artículo 15. Aplicación de la normativa preventiva en el trabajo a distancia.**

Las personas que trabajan a distancia tienen derecho a una adecuada protección en materia de seguridad y salud en el trabajo, de conformidad con lo establecido en la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales, y su normativa de desarrollo.

**Artículo 16. Evaluación de riesgos y planificación de la actividad preventiva.**

Se deben tener en cuenta los riesgos característicos de este tipo de trabajo, poniendo atención en los factores psicosociales, ergonómicos y organizativos. Es de gran importancia tener en cuenta la distribución de la jornada, los tiempos de disponibilidad y la garantía de los descansos y desconexiones durante la jornada.

**Artículo 17. Derecho a la intimidad y a la protección de datos.**

La empresa no podrá exigir la instalación de programas o aplicaciones en dispositivos propiedad del trabajador. Tampoco se puede exigir la utilización de estos dispositivos en el desarrollo del trabajo a distancia.

**Artículo 18. Derecho a la desconexión digital.**

Las personas que trabajan a distancia tienen derecho a la desconexión digital fuera de su horario de trabajo en los términos establecidos en el artículo 88 de la Ley Orgánica 3/2018, de 5 de diciembre

---

# 10. Presupuesto

---

## 10.1. Introducción

A continuación se expone el coste de ejecución del proyecto. Podemos diferenciar 2 partes, la primera donde analizaremos los diseños de experimentos, realización de los planes de ensayo y su correspondiente análisis, y por otro lado los ensayos propiamente dichos.

Para la realización del presupuesto se han tenido en cuenta los materiales utilizados, los equipos de la sala de ensayo, así como sus herramientas especializadas y la mano de obra cualificada para cada momento.

Hay que destacar que para la realización del proyecto todos los materiales necesarios han sido aportados por el CMT, ya que se llevan a cabo muchos proyectos de la misma índole y se necesita de un almacén de piezas de repuesto de un coste elevado y complicado de evaluar. Por lo tanto el presupuesto ha sido basado en las piezas fundamentales y mano de obra sobre todo.

En el presupuesto se han tenido en cuenta tres grupos de costes diferentes:

- **Mano de obra directa.** Todo el personal necesario para llevar a cabo el proyecto, se valorara en Euro/hora dependiendo de su cargo de responsabilidad dentro de proyecto:
  - Ingeniero senior (realización de ensayos, análisis y tratamiento de datos).
  - Ingeniero junior (montaje y desmontaje, mantenimiento, apoyo durante la realización de ensayos).
  - Operario de laboratorio
- **Amortización de los equipos utilizados.** Según la normativa de la unión europea se considera un periodo entorno a los 10 años para todos los equipos y sistemas. El cual se considera lineal independientemente de la carga de trabajo que reciban.
- **Material fungible.** En este coste se han incluido los materiales que se han consumido o han sido desechados por deterioro. Por ejemplo todo tipo de sensores, filtros, agua, electricidad, etc.

## 10.2. Costes de investigación

### 10.2.1. Coste de mano de obra

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (€/ud.)	Coste parcial (€)
Ingeniero senior	Horas	80	25	2000
Ingeniero junior	Horas	300	17	5100
Operario de laboratorio	Horas	50	14,78	739
<b>Coste total</b>				<b>7739</b>

Cuadro 10.1: Coste de mano de obra

### 10.2.2. Coste de amortización de equipos y sistemas auxiliares

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (€/ud.)	Coste parcial (€)
Sistema de admisión	Horas	50	8,17	408,5
Sistema de escape	Horas	50	0,34	17
Sistema de refrigeración y lubricación	Horas	50	0,84	42
Sistema de combustible	Horas	50	0,98	49
Horiba MEXA 7100 DEGR y sonda NO2	Horas	50	10,55	527,5
Blow-by AVL 442	Horas	50	0,80	40
Codificador angular AVL 364	Horas	50	0,39	19.5
Torquímetro	Horas	50	3,22	161
Freno dinamométrico AMK	Horas	50	8,77	438.5
Pinza amperimétrica	Horas	50	0,06	3
Sistema de adquisición de datos AVL PUMA	Horas	50	13,37	668.5
Sistema de adquisición de datos indicom	Horas	50	0,89	44.5
Acondicionar de combustible	Horas	50	1,66	83
Licencias de software	Horas	50	3,60	180
<b>Coste total</b>				<b>2682</b>

Cuadro 10.2: Coste de amortización de equipos y sistemas auxiliares

### 10.2.3. Coste de material fungible

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (€/ud.)	Coste parcial (€)
Hidrógeno específico para ensayos	Kilos	20	40	800
Filtros de combustible y aceite	Unidad	3	0,36	1.08
Filtro de medidor de contaminantes	Unidad	10	0,89	8.9
Energía eléctrica	KWh	2500	0,25	625
Aceite	Litros	20	0,53	10,60
<b>Coste total</b>				<b>1445.58</b>

Cuadro 10.3: Coste de material fungible

### 10.2.4. Presupuesto total

Descripción	Coste parcial (€)
Mano de obra	7739
Amortización de equipos y sistemas auxiliares	2682
Material fungible	1445.58
<b>Presupuesto total</b>	<b>11866.58</b>

Cuadro 10.4: Presupuesto total de la investigación

---

## 9. Pliego de condiciones

---

### 9.1. Condiciones generales

En esta sección se hará referencia a la condiciones generales requeridas en la sala de ensayos. Las siguientes especificaciones deben cumplirse:

#### **Condiciones de realización de los ensayos**

Se entiende por ensayo del motor, el espacio de tiempo en que este está funcionando y durante el cual se adquieren, a través de los sistemas de medida, datos sobre las condiciones de operación, prestaciones y emisiones de contaminantes para su posterior tratamiento y estudio. Antes y durante este proceso se deben tener en cuenta la normativa que asegura la validez de los ensayos y integridad de los equipos.

#### **Validez de los ensayos**

Para asegurar la validez de los ensayos realizados, se deberá esperar un tiempo prudencial tras poner en marcha el motor permitiendo el calentamiento de este.

Se deberá ajustar, en la medida de lo posible, a las condiciones impuestas como la de presión de admisión, escape, temperatura de admisión y caudales de combustible.

Se ha de asegurar el correcto funcionamiento del medidor de contaminantes Horiba vigilando la limpieza de los filtros. En caso de que no sea así, estos deberán ser cambiados.

#### **Integridad de los equipos**

Algunas de las indicaciones que permiten preservar la integridad de los equipos se presentan a continuación.

Primeramente, antes de poner en funcionamiento el motor, de deberá comprobar que la instalación se encuentre preparada para ello. Una vez se arranca el motor, el acercamiento a las condiciones de ensayo se debe realizar de forma gradual en cuanto a la cantidad de combustible inyectado.

Durante los ensayos se debe asegurar el funcionamiento de lubricación y refrigeración. Asimismo, se deberá vigilar de forma periódica el estado de los elementos de la instalación.

### 9.2. Marco legal

En el marco legal, el Real Decreto 486/1997 del 14 de Abril establece las ordenanzas de seguridad, higiene y salud que aplican las disposiciones del artículo 6 de la Ley 31/1995 del 8 de noviembre sobre prevención de Riesgos Laborales. No obstante, debido a la pandemia de COVID-19 acontecida en el año 2020, se publicó el Real Decreto-ley 28/2020 de trabajo a distancia el 23 de Septiembre de 2020 en el Boletín Oficial del Estado.

### 9.2.1. Real Decreto 488/1997 de 14 de abril

Citando textualmente: 'La Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales, determina el cuerpo básico de garantías y responsabilidades preciso para establecer un adecuado nivel de protección de la salud de los trabajadores frente a los riesgos derivados de las condiciones de trabajo, en el marco de una política coherente, coordinada y eficaz. Según el artículo 6 de la misma serán las normas reglamentarias las que irán fijando y concretando los aspectos más técnicos de las medidas preventivas.'

'Así, son las normas de desarrollo reglamentario las que deben fijar las medidas mínimas que deben adoptarse para la adecuada protección de los trabajadores. Entre ellas se encuentran las destinadas a garantizar que de la utilización de los equipos que incluyen pantallas de visualización por los trabajadores no se deriven riesgos para la seguridad y salud de los mismos.'

Se incluyen artículos referentes a las obligaciones de los empresarios frente a los trabajadores, a la vigilancia de la salud de los trabajadores y al derecho de formación y de obtención de materia de formación de estos.

### 9.2.2. Real Decreto-ley 28/2020

Este decreto recoge aspectos preventivos relacionados con la fatiga física y mental, el uso de pantallas de visualización de datos y los riesgos de aislamiento. Citando textualmente, 'El objeto del Acuerdo era elaborar un marco general a escala europea sobre las condiciones laborales de teletrabajadoras y teletrabajadores y compaginar las necesidades de flexibilidad y seguridad que son comunes a estos y a las empresas. El Acuerdo otorga a las personas trabajadoras a distancia la misma protección global que a las que ejercen sus actividades en los locales de la empresa. En dicho Acuerdo se define el teletrabajo como una forma de organización o de realización del trabajo utilizando las tecnologías de la información, en el marco de un contrato o de una relación laboral, en la que un trabajo que también habría podido realizarse en los locales de la empresa, se ejecuta habitualmente fuera de estos.'

A continuación se pasa al estudio de algunos artículos de interés:

#### **Artículo 1. Ámbito de aplicación**

Establece que el trabajo a distancia regular debe tener como mínimo una referencia de tres meses con un 30 % de la jornada.

#### **Artículo 11. Derecho a la dotación suficiente y mantenimiento de medios, equipos y herramientas**

Toda persona que trabaje a distancia tendrá el derecho a la dotación y mantenimiento de los medios, equipos y herramientas necesarias para el desarrollo del trabajo por parte de la empresa. En caso de dificultades técnicas, se debe garantizar la atención precisa al trabajador.

#### **Artículo 13. Derecho al horario flexible en los términos del acuerdo**

Se deberán respetar los tiempos de disponibilidad obligatoria y la normativa sobre el tiempo de trabajo y descanso.

**Artículo 15. Aplicación de la normativa preventiva en el trabajo a distancia.**

Las personas que trabajan a distancia tienen derecho a una adecuada protección en materia de seguridad y salud en el trabajo, de conformidad con lo establecido en la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales, y su normativa de desarrollo.

**Artículo 16. Evaluación de riesgos y planificación de la actividad preventiva.**

Se deben tener en cuenta los riesgos característicos de este tipo de trabajo, poniendo atención en los factores psicosociales, ergonómicos y organizativos. Es de gran importancia tener en cuenta la distribución de la jornada, los tiempos de disponibilidad y la garantía de los descansos y desconexiones durante la jornada.

**Artículo 17. Derecho a la intimidad y a la protección de datos.**

La empresa no podrá exigir la instalación de programas o aplicaciones en dispositivos propiedad del trabajador. Tampoco se puede exigir la utilización de estos dispositivos en el desarrollo del trabajo a distancia.

**Artículo 18. Derecho a la desconexión digital.**

Las personas que trabajan a distancia tienen derecho a la desconexión digital fuera de su horario de trabajo en los términos establecidos en el artículo 88 de la Ley Orgánica 3/2018, de 5 de diciembre

---

# 10. Presupuesto

---

## 10.1. Introducción

A continuación se expone el coste de ejecución del proyecto. Podemos diferenciar 2 partes, la primera donde analizaremos los diseños de experimentos, realización de los planes de ensayo y su correspondiente análisis, y por otro lado los ensayos propiamente dichos.

Para la realización del presupuesto se han tenido en cuenta los materiales utilizados, los equipos de la sala de ensayo, así como sus herramientas especializadas y la mano de obra cualificada para cada momento.

Hay que destacar que para la realización del proyecto todos los materiales necesarios han sido aportados por el CMT, ya que se llevan a cabo muchos proyectos de la misma índole y se necesita de un almacén de piezas de repuesto de un coste elevado y complicado de evaluar. Por lo tanto el presupuesto ha sido basado en las piezas fundamentales y mano de obra sobre todo.

En el presupuesto se han tenido en cuenta tres grupos de costes diferentes:

- **Mano de obra directa.** Todo el personal necesario para llevar a cabo el proyecto, se valorara en Euro/hora dependiendo de su cargo de responsabilidad dentro de proyecto:
  - Ingeniero senior (realización de ensayos, análisis y tratamiento de datos).
  - Ingeniero junior (montaje y desmontaje, mantenimiento, apoyo durante la realización de ensayos).
  - Operario de laboratorio
- **Amortización de los equipos utilizados.** Según la normativa de la unión europea se considera un periodo entorno a los 10 años para todos los equipos y sistemas. El cual se considera lineal independientemente de la carga de trabajo que reciban.
- **Material fungible.** En este coste se han incluido los materiales que se han consumido o han sido desechados por deterioro. Por ejemplo todo tipo de sensores, filtros, agua, electricidad, etc.

## 10.2. Costes de investigación

### 10.2.1. Coste de mano de obra

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (€/ud.)	Coste parcial (€)
Ingeniero senior	Horas	80	25	2000
Ingeniero junior	Horas	300	17	5100
Operario de laboratorio	Horas	50	14,78	739
<b>Coste total</b>				<b>7739</b>

Cuadro 10.1: Coste de mano de obra

### 10.2.2. Coste de amortización de equipos y sistemas auxiliares

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (€/ud.)	Coste parcial (€)
Sistema de admisión	Horas	50	8,17	408,5
Sistema de escape	Horas	50	0,34	17
Sistema de refrigeración y lubricación	Horas	50	0,84	42
Sistema de combustible	Horas	50	0,98	49
Horiba MEXA 7100 DEGR y sonda NO2	Horas	50	10,55	527,5
Blow-by AVL 442	Horas	50	0,80	40
Codificador angular AVL 364	Horas	50	0,39	19.5
Torquímetro	Horas	50	3,22	161
Freno dinamométrico AMK	Horas	50	8,77	438.5
Pinza amperimétrica	Horas	50	0,06	3
Sistema de adquisición de datos AVL PUMA	Horas	50	13,37	668.5
Sistema de adquisición de datos indicom	Horas	50	0,89	44.5
Acondicionar de combustible	Horas	50	1,66	83
Licencias de software	Horas	50	3,60	180
<b>Coste total</b>				<b>2682</b>

Cuadro 10.2: Coste de amortización de equipos y sistemas auxiliares

### 10.2.3. Coste de material fungible

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (€/ud.)	Coste parcial (€)
Hidrógeno específico para ensayos	Kilos	20	40	800
Filtros de combustible y aceite	Unidad	3	0,36	1.08
Filtro de medidor de contaminantes	Unidad	10	0,89	8.9
Energía eléctrica	KWh	2500	0,25	625
Aceite	Litros	20	0,53	10,60
<b>Coste total</b>				<b>1445.58</b>

Cuadro 10.3: Coste de material fungible

### 10.2.4. Presupuesto total

Descripción	Coste parcial (€)
Mano de obra	7739
Amortización de equipos y sistemas auxiliares	2682
Material fungible	1445.58
<b>Presupuesto total</b>	<b>11866.58</b>

Cuadro 10.4: Presupuesto total de la investigación