

Trabajo Final de Máster

**Máster en Ingeniería de la Automoción (MUEA)**

**ESTUDIO DE LAS EMISIONES DE GASES CONTAMINANTES DE  
UN CICLO OTTO Y PROPUESTA DE MEJORA MEDIANTE  
INYECCIÓN DE HIDRÓGENO**

**MEMORIA**

**Autor:** Oriol Fosalba Vidal  
Ricardo Gracia Madrudejos  
**Director:** Vicente de Medina  
**Convocatoria:** Junio 2020



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona





## RESUMEN

En un entorno consciente sobre la contaminación y la baja eficiencia de los motores térmicos, cualquier mejora en estos sistemas de propulsión de vehículos es un gran avance. En este trabajo se pretende estudiar, para posteriormente diseñar y dimensionar, un sensor portátil de medición de CO, así como un sistema de mejora basado en la inyección de hidrógeno.

Este sistema dota al motor de una mayor eficiencia y reduce el consumo de combustible, así como la concentración de gases contaminantes que éste emite a la atmósfera. Pero por el contrario también disminuye su potencia.

Todos los factores mencionados se van a estudiar a lo largo del trabajo y se va a determinar la certeza de estos para poder llegar a conocer si realmente este sistema es una solución viable para los motores de combustión interna actuales.

*Palabras clave: Motor, combustión, Hidrógeno, sensor, emisiones, contaminación, monóxido de Carbono.*

## RESUM

En un entorn conscient sobre la contaminació i la baixa eficiència del motors tèrmics, qualsevol millora implementada en aquests sistemes de propulsió és un gran avenç. En aquest treball es pretén estudiar, per posteriorment dissenyar i dimensionar un sensor portàtil de mesura de CO, així com un sistema de millora basat en la injecció d'hidrogen.

Aquest sistema dota al motor d'una major eficiència i en redueix el consum de combustible, així com la concentració de gasos contaminants que aquest emet a l'atmosfera. Però per contra també en disminueix la potència.

Tots els factors esmentats s'estudiaran al llarg del treball i se'n determinarà la seva certesa per arribar a conèixer si realment aquest sistema és una solució viable per als motors de combustió interna actuals.

*Paraules clau: Motor, combustió, Hidrogen, sensor, emissions, contaminació, monòxid de Carboni.*

## ABSTRACT

In an environment aware of the thermal power units' contamination and low efficiency, any implemented improvement becomes a great step forward. This project is intended to study these motors, to be able to design and dimension two different systems afterwards. The first one is a portable CO measurement equipment, and the second one is an improvement system based on the injection of hydrogen in the motor.

This system provides the engine with greater efficiency and reduces its fuel consumption, as well as the concentration of polluting gases that it emits into the atmosphere. But on the other hand, it also decreases its power.

All the above-mentioned factors will be studied throughout the work and the certainty of these will be determined in order to know if this system is really a viable solution for current internal combustion engines.

*Key words: Engine, Combustion, Hydrogen, Sensor, Emissions, Pollution, Carbon Monoxide.*

## GLOSARIO

LDV → Light Duty Vehicle

HDV → Heavy Duty Vehicle

NEDC → New Emissions Driving Cycle

VW → Volkswagen

R(EU) → Reglamento de la Unión Europea

PEMS → Portable Emissions Measurement System

RDE → Real Driving Emissions

ST → Servicio Técnico

GPS → Global Positioning System

ECU → Engine Controlling Unit

IDE → Integrated Drive Electronics

PCI → Poder Calorífico Inferior

PMS → Punto Muerto Superior

BEV → Battery Electric Vehicle

FCEV → Fuel Cell Electric Vehicle

ICE → Internal Combustion Engine

PWM → Pulse-Width Modulation

LES → Lotus Engine Simulation

## TABLA DE CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| Resumen.....   | 2  |
| Resum.....   | 3  |
| Abstract .....   | 4  |
| Glosario .....   | 5  |
| Tabla de Figuras.....  | 9  |
| Tabla de Tablas.....   | 11 |
| CAPÍTULO 0 : INTRODUCCIÓN .....                                      | 12 |
| 0.1    Objetivo.....   | 12 |
| 0.1.1    Objetivo principal .....                                    | 12 |
| 0.1.2    Objetivos específicos .....                                 | 12 |
| 0.2    Motivación .....  | 12 |
| CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN TEÓRICA DEL SENSOR DE EMISIONES.....        | 14 |
| 1.1    Antecedentes .....  | 14 |
| 1.2    Actualidad .....  | 15 |
| 1.2.1    “Leak check” .....  | 17 |
| 1.2.2    PEMS validation .....                                       | 17 |
| 1.2.3    Calibración del equipo PEMS.....                            | 18 |
| 1.2.4    “Drift check” .....   | 19 |
| 1.3    Monóxido de Carbono .....                                     | 20 |
| 1.4    Bases teóricas del Sensor.....                                | 20 |
| CAPÍTULO 2: DISEÑO DEL SENSOR .....                                  | 22 |
| 2.1    Sensor de temperatura y humedad .....                         | 22 |
| 2.2    Sensor de monóxido de carbono (CO) .....                      | 22 |
| 2.3    Sensor de hidrógeno (H <sub>2</sub> ).....                    | 23 |
| 2.4    Caudalímetro .....  | 24 |
| 2.5    Integración del sistema de medición .....                     | 24 |
| CAPÍTULO 3: INTRODUCCIÓN TEÓRICA DE LA INYECCIÓN DE HIDRÓGENO.....   | 26 |
| 3.1    Antecedentes y actualidad.....                                | 26 |
| 3.2    Bases teóricas de la inyección de Hidrógeno.....              | 28 |
| 3.2.1    ¿Qué retos plantea la implementación de este sistema? ..... | 30 |
| 3.3    Características del grupo electrógeno .....                   | 31 |
| 3.4    Posibles soluciones a los retos planteados .....              | 32 |
| 3.5    Generador de Hidrógeno .....                                  | 33 |
| CAPÍTULO 4: DISEÑO DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DE HIDRÓGENO.....        | 34 |
| 4.1    Cálculo energético .....                                      | 34 |

|  |  |    |
|--|--|----|
| 4.1.1  | Hipótesis iniciales .....  | 34 |
| 4.1.2  | Cálculo energético de la combustión de ambos combustibles .....                  | 34 |
| 4.1.3  | Cálculo energético para la hibridación de combustibles (Parte 1) .....           | 37 |
| 4.1.4  | Cálculo energético para la hibridación de combustibles (Parte 2) .....           | 40 |
| 4.2  | Cálculo emisiones .....  | 40 |
| 4.2.1  | Hipótesis iniciales .....  | 40 |
| 4.2.2  | Cálculo de las emisiones por la combustión de ambos combustibles .....           | 41 |
| 4.2.3  | Cálculo de las emisiones por la combustión híbrida ideal (Parte 1) .....         | 43 |
| 4.2.4  | Cálculo de las emisiones por la combustión híbrida ideal (Parte 2) .....         | 44 |
| 4.2.5  | Cálculo de las emisiones por la combustión “real” de la gasolina.....            | 44 |
| 4.2.6  | Cálculo de las emisiones por la combustión híbrida “reales” (Parte 1).....       | 46 |
| 4.2.7  | Cálculo de las emisiones por la combustión híbrida “reales” (Parte 2).....       | 47 |
| 4.3  | Modelo de combustión.....  | 48 |
| 4.3.1  | Hipótesis iniciales .....  | 48 |
| 4.3.2  | Modelo de combustión gasolina .....  | 48 |
| 4.3.3  | Modelo de combustión híbrido v.1 .....   | 52 |
| 4.3.4  | Modelo de combustión híbrido v.2 .....   | 54 |
| CAPÍTULO 5: TERMODINÁMICA DEL CILINDRO .....   |  | 57 |
| 5.1  | Diagrama P-V .....   | 57 |
| 5.1.1  | Hipótesis iniciales .....  | 57 |
| 5.1.2  | Cálculo del diagrama P-V mediante Matlab para combustión de gasolina .....       | 57 |
| 5.1.3  | Cálculo del diagrama P-V mediante Matlab para combustión híbrida (Parte 1) ..... | 58 |
| 5.1.4  | Cálculo del diagrama P-V mediante Matlab para combustión híbrida (Parte 2) ..... | 59 |
| 5.2  | Diagrama P-V optimizado .....  | 60 |
| 5.2.1  | Hipótesis iniciales .....  | 60 |
| 5.2.2  | Cálculo diagrama P-V optimizado.....   | 61 |
| 5.3  | Estimación preliminar del rendimiento del motor.....                             | 62 |
| CAPÍTULO 6: SIMULACIÓN DEL MOTOR COMPLETO..... |  | 63 |
| 6.1  | Simulación del motor .....   | 63 |
| 6.1.1  | Simulación del motor para el modelo de combustión de gasolina .....              | 66 |
| 6.1.2  | Simulación del motor para el modelo de combustión híbrida (parte 1) .....        | 67 |
| 6.1.3  | Simulación del motor para el modelo de combustión híbrida (parte 1) .....        | 68 |
| CAPÍTULO 7: PRESUPUESTO .....                  |  | 69 |
| CAPÍTULO 8: PLANIFICACIÓN.....                 |  | 70 |
| CAPÍTULO 9: CONCLUSIONES .....                 |  | 74 |
| 9.1  | Sensor .....   | 74 |
| 9.2  | Inyección de hidrógeno.....  | 74 |



|  |     |
|--|-----|
| 9.3 Trabajos futuros.....  | 76  |
| AGRADECIMIENTOS.....   | 77  |
| BIBLIOGRAFÍA.....  | 78  |
| ANEXOS .....   | 80  |
| ANEXO 1: Implementación del sensor de temperatura y humedad .....                  | 80  |
| ANEXO 2: Implementación del sensor de monóxido de carbono .....                    | 81  |
| ANEXO 3: Implementación del sensor de hidrógeno .....                              | 85  |
| ANEXO 4: Implementación del Caudalímetro .....                                     | 88  |
| ANEXO 5: Implementación del conjunto de sensores.....                              | 90  |
| ANEXO 6: Cálculo energético de la combustión de ambos combustibles .....           | 94  |
| ANEXO 7: Cálculo energético para la hibridación de combustibles (Parte 1).....     | 95  |
| ANEXO 8: Cálculo energético para la hibridación de combustibles (Parte 2).....     | 96  |
| ANEXO 9: Cálculo de las emisiones por la combustión de ambos combustibles .....    | 97  |
| ANEXO 10: Cálculo de las emisiones por la combustión híbrida ideal (Parte 1) ..... | 98  |
| ANEXO 11: Cálculo de las emisiones por la combustión híbrida ideal (Parte 2) ..... | 99  |
| ANEXO 12: Cálculo de las emisiones por la combustión “real” de la gasolina .....   | 100 |
| ANEXO 13: Cálculo de las emisiones por la combustión híbrida “reales” (P. 1).....  | 101 |
| ANEXO 14: Cálculo de las emisiones por la combustión híbrida “reales” (P. 2).....  | 102 |
| ANEXO 15: Modelo de combustión gasolina.....                                       | 103 |
| ANEXO 16: Modelo de combustión híbrido v.1.....                                    | 105 |
| ANEXO 17: Modelo de combustión híbrido v.2.....                                    | 107 |

TABLA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Ciclo NEDC. Fuente: SEAT S.A. ....   | 14 |
| Figura 2. Ciclo WLTC. Fuente: SEAT S.A. ....   | 15 |
| Figura 3. Módulos que componen un equipo PEMS. Fuente: HORIBA. ....  | 16 |
| Figura 4. Imagen del sistema de medición PEMS completo. Fuente: JOVE.....  | 16 |
| Figura 5. Esquema de un sensor electroquímico. Fuente: Industrial Scientific.....  | 23 |
| Figura 6. Vista general de la disposición de los sensores. Fuente: propia. ....  | 25 |
| Figura 7. Caja de Arduino. ....  | 25 |
| Figura 8. Papeles que puede jugar el hidrógeno en la transición energética. Fuente: McKinsey & Company, 2017.....  | 26 |
| Figura 9. Esquema del BMW Hydrogen 7. Fuente: Motorpasión.....   | 28 |
| Figura 10. Herramienta "concept builder" del software "Lotus engine simulator. Fuente: propia. ....  | 32 |
| Figura 11. Comparación de la función estándar de Wiebe obtenida de forma experimental vs. el método definido por la ecuación (25). Fuente: (Yousufuddin, 2017). .... | 50 |
| Figura 12. Modelo de combustión de la gasolina y su derivada. Fuente: propia. ....   | 51 |
| Figura 13. Velocidad de propagación de la llama. Fuente: (Sun Bai-gang, 2013).....   | 52 |
| Figura 14. Modelo de combustión para el caso de estudio de la hibridación de combustibles y su derivada. Fuente: propia. ....  | 54 |
| Figura 15. Ángulos característicos de la combustión del hibridaje de combustibles. Fuente: (Yaodong Du, 2015).....   | 55 |
| Figura 16. Diagrama P-V de la gasolina. Fuente: propia.....  | 58 |
| Figura 17. Diagrama P-V del modelo híbrido 1. Fuente: propia. ....   | 59 |
| Figura 18. Diagrama P-V del modelo híbrido 2. Fuente: propia. ....   | 60 |
| Figura 19. Diagrama P-V optimizado del modelo de gasolina. Fuente: propia. ....  | 61 |
| Figura 20. Diagrama P-V optimizado del modelo híbrido 1. Fuente: propia. ....  | 61 |
| Figura 21. Diagrama P-V optimizado del modelo híbrido 2. Fuente: propia. ....  | 62 |
| Figura 22. Características predeterminadas de la gasolina. Fuente: propia. ....  | 63 |
| Figura 23. Modelo de combustión propio introducido en el programa. Fuente: propia. ....  | 63 |
| Figura 24. Ejemplo de gráfico Presión vs. $\theta$ Cigüeñal. Fuente: propia.....   | 64 |
| Figura 25. Introducción de los datos generales del modelo de combustión. Fuente: propia. ....  | 64 |
| Figura 26. Introducción de los datos de presión del modelo de combustión. Fuente: propia.....  | 65 |
| Figura 27. Resumen del modelo de combustión introducido en el software. Fuente: propia.....  | 65 |
| Figura 28. Esquema de conexiones del DHT11. Fuente: aprendiendoarduino.com ....  | 80 |
| Figura 29. Voltaje alternativo necesario para medir con un MQ-7. Fuente: Hanwei electronics CO., LTD. ....   | 81 |
| Figura 30. Esquema de conexiones del MQ-7. Fuente: Naylamp mechatronics. ....  | 81 |
| Figura 31. Curva de sensibilidad del MQ-7. Fuente: Hanwei electronics CO., LTD. ....   | 82 |
| Figura 32. Aproximación de la curva de sensibilidad del CO para un MQ-7. Fuente: propia. ....  | 82 |

Figura 33. Curva de sensibilidad del MQ-8. Fuente: Hanwei electronics CO., LTD. .... 85

Figura 34. Curva de sensibilidad del MQ-8. Fuente: Hanwei electronics CO., LTD. .... 85

Figura 35. Aproximación de la curva de sensibilidad del H<sub>2</sub> para un MQ-8. Fuente: propia. .... 86

Figura 36. Esquema de conexiones del YF-S401. Fuente: Naylamp mechatronics. .... 88

Figura 37. Conexiones de los 4 sensores. Fuente: propia. .... 90

## TABLA DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Tabla comparativa entre los ciclos de referencia. Fuente: propia.....  | 15 |
| Tabla 2. Valores límite para validar el equipo PEMS para cada uno de los contaminantes medidos. Fuente: R(EU) 2018/1832 .....   | 17 |
| Tabla 3. Diferencia permitida en los valores de concentración de emisiones de contaminantes para los fluidos referencia y límites permitidos en la realización del “drift check”. Fuente: R(EU) 2018/1832 ..... | 18 |
| Tabla 4. Valores límite de emisiones permitidas. Fuente: Delphi Technologies. ....  | 19 |
| Tabla 5. Intervalos de trabajo de un DHT11. Fuente: Diotronic S.A. ....   | 22 |
| Tabla 6. Intervalos de trabajo de un MQ-7. Fuente: Sensorae.....  | 22 |
| Tabla 7. Intervalos de trabajo de un MQ-8. Fuente: Hanwei electronics CO., LTD. ....  | 23 |
| Tabla 8. Intervalos de trabajo de un MQ-8. Fuente: Naylamp mechatronics. ....   | 24 |
| Tabla 9. Propiedades físicas de la Gasolina. Fuente: EERC. ....   | 28 |
| Tabla 10. Propiedades físicas del hidrógeno. Fuente: EERC. ....   | 29 |
| Tabla 11. Características físicas del motor del grupo electrógeno. Fuente: propia. ....   | 31 |
| Tabla 12. Concentración de cada uno de los contaminantes que emite un motor de combustión interna sin catalizador. Fuente: L. R. Sassykova, 2018. ....  | 45 |
| Tabla 13. Resultados de las emisiones producidas por la combustión de la gasolina. Fuente: propia. ....   | 45 |
| Tabla 14. Resultados de las emisiones producidas por la combustión de la gasolina. Fuente: propia. ....   | 47 |
| Tabla 15. Resultados de las emisiones producidas por la combustión de la gasolina. Fuente: propia. ....   | 47 |
| Tabla 16. Comparación de los rendimientos calóricos para los tres casos de estudio. Fuente: propia. ....  | 62 |
| Tabla 17. Resumen de resultados de la simulación del motor de combustión de gasolina. Fuente: propia .....  | 66 |
| Tabla 18. Resumen de gases de escape emitidos por el motor de combustión de gasolina. Fuente: propia. ....  | 66 |
| Tabla 19. Resumen de rendimientos del motor de combustión de gasolina. Fuente: propia .....   | 67 |
| Tabla 20. Resumen de resultados de la simulación del motor de combustión híbrida 1. Fuente: propia. 67  | 67 |
| Tabla 21. Resumen de rendimientos del motor de combustión de híbrida 1. Fuente: propia. ....  | 67 |
| Tabla 22. Resumen de resultados de la simulación del motor de combustión híbrida 2. Fuente: propia. 68  | 68 |
| Tabla 23. Resumen de rendimientos del motor de combustión de híbrida 2. Fuente: propia .....  | 68 |

## CAPÍTULO 0 : INTRODUCCIÓN

En este trabajo de final de Máster se pretende desarrollar un sistema de medición de CO portátil para medir el nivel de emisiones de distintos motores de combustión interna, basado en el motor de un grupo electrógeno. A este motor se le procurará aplicar una mejora basada en la inyección de hidrógeno que se estudiará a partir de distintos métodos de cálculo y simulación. Una vez desarrollado el sensor, se pretende ver la influencia que tiene la inyección de hidrógeno en el motor del grupo electrógeno, midiendo las emisiones de CO antes y después de las modificaciones que se requieran.

### 0.1 OBJETIVO

#### 0.1.1 OBJETIVO PRINCIPAL

El objetivo principal de este trabajo consiste en desarrollar e implementar un sensor de medición de CO mediante una placa de Arduino, así como implementar una mejora en el motor de un grupo electrógeno basada en la inyección de hidrógeno. Esta mejora se llevará a cabo tras lo presentado en este trabajo final de máster y consistirá, a grandes rasgos, en el estudio de las emisiones teóricas, la adaptación del modelo de combustión y la posterior simulación del motor teniendo en cuenta las variaciones producidas por la mejora.

#### 0.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Además del objetivo principal descrito en el punto anterior, este proyecto tiene otros objetivos específicos que se detallan en la siguiente lista:

1. Estudiar las modificaciones necesarias a introducir en el motor con la finalidad de implementar el sistema de mejora basado en hidrógeno.
2. Comparar los resultados extraídos de los distintos apartados de cálculo y simulación de las variaciones que se producen en el motor como respuesta a la mejora implementada.
3. Determinar si el sistema de mejora propuesto tendría un lugar en el sector de la automoción actual.
4. Desarrollar un sensor compatible con el máximo número de motores posibles, teniendo en cuenta que el rango de trabajo será limitado.
5. Demostrar el buen funcionamiento del sensor, así como del sistema de mejora propuesto.
6. Estudiar la viabilidad de implementar el sensor en todos los vehículos para hacer un “tracking” de las emisiones a lo largo de su vida útil.

### 0.2 MOTIVACIÓN

La intención de mejorar el rendimiento de los motores de combustión en una época en la que todo apunta hacia una movilidad diferente, propulsada por cualquier tipo de combustible a excepción de los combustibles fósiles, es algo que a pocos preocupa.

Dar respuesta a las cuestiones más inmediatas como por ejemplo la contaminación que se va a emitir o que se está emitiendo hasta que no se alcance la total renovación de un parque automovilístico anticuado y contaminante, es uno de las motivaciones que nos ha impulsado a realizar este trabajo.

Otro de los motivos que nos ha impulsado a realizar este trabajo ha sido el hecho de poder controlar en tiempo real las emisiones de los vehículos que circulan por las carreteras de nuestro país, para así determinar cualquier anomalía en su funcionamiento que pueda repercutir negativamente en el medioambiente.

Ante la creciente preocupación que suponen para cualquier amante del mundo de la automoción los hechos anteriormente comentados, hemos decidido aportar con este trabajo un granito de arena para que se tomen las decisiones correctas y asegurar la subsistencia de un sector cada vez más desgastado.

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN TEÓRICA DEL SENSOR DE EMISIONES

### 1.1 ANTECEDENTES

La homologación de un vehículo consiste en analizar, estudiar y validar que todos los sistemas que lo componen cumplen con los requisitos que establece la normativa del sistema en cuestión. En 2015 salió a la luz que el fabricante alemán de vehículos Volkswagen (VW) había instalado un software en sus vehículos de forma oculta, es decir, que no se había homologado como parte del sistema, que tenía como objetivo falsear los valores de emisiones contaminantes de vehículos diésel. Este escándalo, aparte de acarrear muchos problemas a la empresa y a los servicios técnicos de homologación, también generó consecuencias positivas como la creación de un nuevo método de homologación de emisiones contaminantes en los vehículos tanto ligeros (LDV) como pesados (HDV).

El reglamento R(EU) 2018/1832 del 27 de noviembre de 2018 es el reglamento de la Unión Europea que hace referencia a la homologación de tipo, referente a emisiones contaminantes. Este reglamento, vigente en la actualidad, y que enmienda al R(EU) 2017/1151, establece métodos de análisis de las emisiones de los vehículos de tal forma que las “trampas” realizadas por el grupo VW no se repitan por parte de ningún fabricante. Estos métodos se describirán más adelante en el documento.

Por lo que al reglamento enmendado se refiere, el R(EU) 2017/1151, éste sólo definía un procedimiento para el estudio de emisiones contaminantes, así como un modelo de conducción teórico poco realista, como era el ciclo NEDC. Este ciclo era poco representativo ya que estaba basado en aceleraciones y mantenimiento de velocidades (Figura 1).

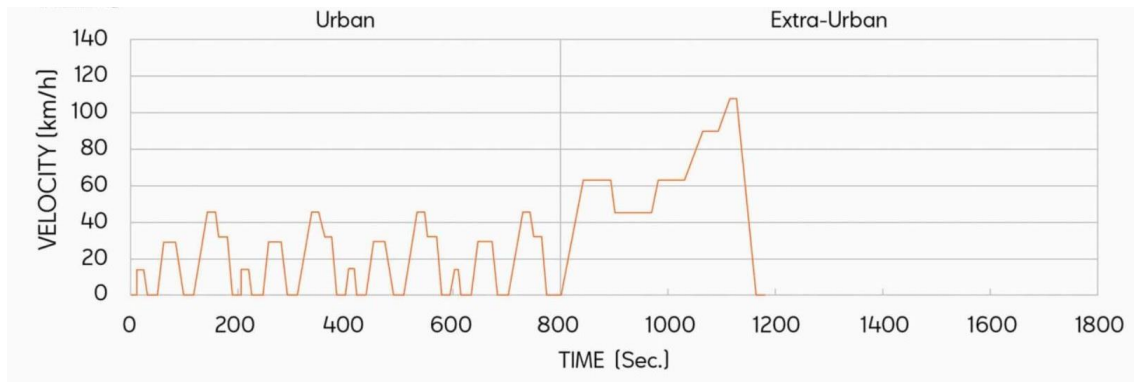


Figura 1. Ciclo NEDC. Fuente: SEAT S.A.

La representatividad de este ciclo era muy cuestionada en el sector ya que los consumos declarados por los fabricantes como resultado de sus pruebas, distaban mucho de los valores que declaraban los clientes como consumos reales de los vehículos en cuestión.

Por otro lado, y en la línea de lo que se comentaba anteriormente, en el reglamento R(EU) 2017/1151 solo se definía un método de ensayo. Este método era “estático”, es decir, el coche no salía a rodar a la calle en condiciones reales y todo se limitaba a medir en un banco de rodillos con ventilador forzado. Este hecho permitía a los fabricantes “trampear” los resultados de emisiones, como hizo VW.

Con la aparición del nuevo reglamento, el R(EU) 2018/1832, se solucionaron muchas de las deficiencias y mejoraron muchos aspectos del reglamento R(EU) 2017/1151, tal y como se va a exponer en el siguiente apartado.

## 1.2 ACTUALIDAD

En la actualidad, con la aparición del reglamento mencionado en el apartado anterior, el R(EU) 2018/1832, las cosas han cambiado: la metodología de ensayo se ha modificado, siendo ahora más estricta, y se han incorporado nuevas condiciones de ensayo, así como nuevos métodos de cálculo.

Hay dos mejoras implementadas que destacan respecto a la normativa precedente y que son de interés para poner en situación al lector de este documento. La primera es la modificación del procedimiento (WLTP) y ciclo (WLTC) de ensayo de referencia. El ciclo se ha visto modificado con la finalidad de establecer uno que se asemeje más a un ciclo de conducción real para, de esta forma, obtener valores tanto de emisiones como de consumos más realistas. Este ciclo es conocido por las siglas WLTC, y tiene la forma que se define en la Figura 2.

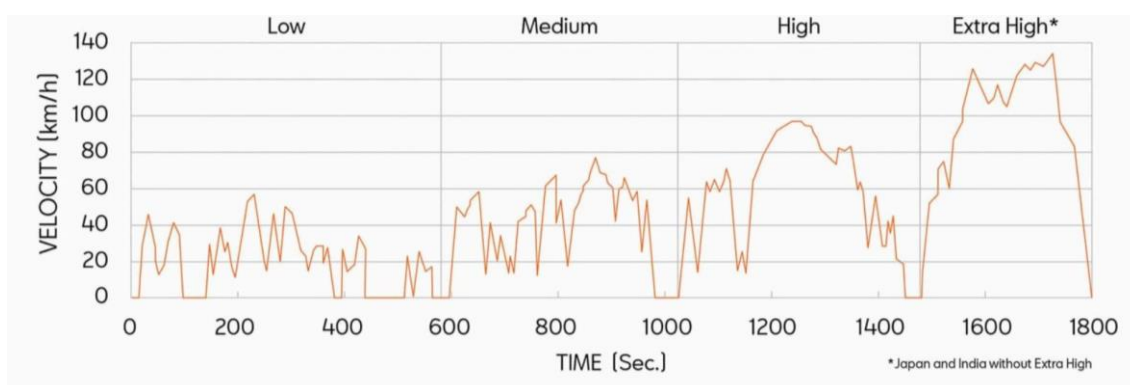


Figura 2. Ciclo WLTC. Fuente: SEAT S.A.

El nuevo ciclo de referencia (WLTC), presenta muchas diferencias significativas respecto a su predecesor (NEDC), que se muestran reflejadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Tabla comparativa entre los ciclos de referencia. Fuente: propia

|                                 | NEDC                         | WLTC                           | Ud.  |
|---------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------|
| Distancia                       | 11                           | 23,25                          | km   |
| Temperatura de inicio de ensayo | 20                           | 14                             | °C   |
| Fases de ensayo                 | Urbano – Extraurbano - Mixto | Baja – Media – Alta – Muy alta | N/A  |
| Paradas permitidas/tiempo total | 25                           | 6 - 30                         | %    |
| Velocidad                       | 121                          | 131                            | km/h |

Por otro lado, y el motivo por el cual se hace referencia a la normativa actual, el reglamento vigente obliga a homologar tanto consumos como emisiones en celda de ensayos, así como en condiciones de conducción real (RDE). Esta es la segunda gran mejora que se implementó en la reforma y mejora del reglamento R(EU) 2017/1151. Ahora los vehículos se deben homologar siendo testados en carretera abierta. Este hecho revolucionó el sector de homologaciones obligando a desarrollar un sistema de medición portátil, también conocido como PEMS (Portable Emissions Measurement System).

Los sistemas de medición portátil PEMS son equipos de alta complejidad que funcionan por módulos, permitiendo así al ST (Servicio Técnico) realizar mediciones de los elementos y los gases que sean de interés para la homologación o el estudio del comportamiento de un vehículo.



En la normativa a la que se hace referencia se establecen los requerimientos de cada uno de los módulos que componen el PEMS, así como los módulos de los que debe estar dotado un vehículo cuando está siendo analizado. Estos módulos son los que se describen a continuación:

- Analizadores para determinar la concentración de contaminantes en los gases de escape.
- Múltiples sensores o instrumentos para determinar el flujo másico de escape.
- GPS: Para determinar la posición del vehículo, así como la altitud y su velocidad.
- Una fuente de alimentación distinta a la del vehículo para alimentar todos los módulos.
- Otros instrumentos y sensores para medir temperaturas, humedad, presión del aire y velocidad del vehículo, siempre que se requiera alguno de estos parámetros.
- Se puede requerir, también, una conexión a la ECU del vehículo.



Figura 3. Módulos que componen un equipo PEMS. Fuente: HORIBA.

Con la finalidad de poder tomar muestras en tiempo real, el conjunto de módulos que conforman el sistema está conectado al escape del vehículo mediante tubos que recirculan los gases hasta el interior de los módulos, conectados en cascada entre sí. La disposición de los módulos, así como la de las adaptaciones de los sistemas de escape para tomar mediciones varían según ST y según vehículo, ya que dependiendo de la disposición del sistema de escape y del tipo de combustible se deben montar unos módulos u otros y los tubos tendrán una forma u otra. A continuación, se muestra en la Figura 4 un ejemplo de un equipo PEMS montado en un vehículo.



Figura 4. Imagen del sistema de medición PEMS completo. Fuente: JOVE

Como es de esperar, en la normativa no solo se definen los módulos que deben componer un sistema PEMS y sus características, sino también el procedimiento de calibración que se debe llevar a cabo para garantizar que la medición del equipo sea real y fiable. Este procedimiento tiene cuatro etapas clave mediante las cuales se garantiza que las mediciones que realiza el equipo son reales y, por lo tanto, se pueden tomar como datos fiables para analizar las emisiones de un determinado vehículo.

### 1.2.1 “LEAK CHECK”

Esta primera fase se lleva a cabo con la finalidad de garantizar que el equipo PEMS es estanco. Es un procedimiento interno de cada uno de los módulos que conforman el equipo, que verifica la ausencia de fugas internas e indica el valor de la concentración residual de contaminantes que hay en cada circuito del sistema. Es una etapa imprescindible ya que en caso de que el sistema tuviera alguna fuga o defecto interno, las mediciones efectuadas no serían reales ya que los gases y partículas escaparían o bien podría haber perturbaciones externas que afectarían a los resultados.

### 1.2.2 PEMS VALIDATION

Es el segundo paso en lo que a ensayos en carretera abierta se refiere. Con este proceso se garantiza que el equipo realiza mediciones reales, midiendo simultáneamente en una celda de ensayos las emisiones del vehículo mediante el equipo de medición PEMS y los equipos de medición de la celda. De este modo se puede determinar si el equipo PEMS mide valores semejantes a los medidos por la celda, cumpliendo con los límites establecidos por la norma, y siendo los valores obtenidos mediante los equipos de la celda los valores de referencia para este tipo de ensayos. Los límites de aceptación para validar el equipo de medición PEMS se definen en la siguiente tabla (Tabla 2):

**Tabla 2.** Valores límite para validar el equipo PEMS para cada uno de los contaminantes medidos. Fuente: R(EU) 2018/1832

| <i>Permissible tolerances</i>         |   |
|---------------------------------------|---|
| Parameter [Unit]                      | Permissible absolute tolerance  |
| Distance [km] <sup>46</sup>           | 250 m of the laboratory reference   |
| THC <sup>47</sup> [mg/km]             | 15 mg/km or 15 % of the laboratory reference, whichever is larger                             |
| CH <sub>4</sub> <sup>48</sup> [mg/km] | 15 mg/km or 15 % of the laboratory reference, whichever is larger                             |
| NMHC <sup>49</sup> [mg/km]            | 20 mg/km or 20 % of the laboratory reference, whichever is larger                             |
| PN <sup>50</sup> [# /km]              | 1•10 <sup>11</sup> p/km or 50 % of the laboratory reference <sup>51</sup> whichever is larger |
| CO <sup>52</sup> [mg/km]              | 150 mg/km or 15 % of the laboratory reference, whichever is larger                            |
| CO <sub>2</sub> [g/km]                | 10 g/km or 10 % of the laboratory reference, whichever is larger                              |
| NO <sub>x</sub> <sup>53</sup> [mg/km] | 15 mg/km or 15 % of the laboratory reference, whichever is larger                             |

### 1.2.3 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO PEMS

Este paso se realiza de forma previa a la realización de una ruta RDE (Real Driving Emissions) y es el paso previo a la realización de cualquier ensayo referente a emisiones con medición mediante equipo portátil. Con la finalidad de establecer el valor cero del equipo PEMS para garantizar que la medición no se ve alterada por la presencia de contaminantes en el ambiente, se realiza una calibración con dos gases conocidos. Estos gases son los denominados “air” o “Zero” y “span”. Cada uno de estos dos fluidos tiene una composición conocida que permite establecer el cero absoluto del equipo, así como realizar una nueva comprobación del mismo comparando los valores de concentración declarados en las botellas de estos y los leídos por el equipo de medición portátil. La diferencia permitida entre los valores leídos y los declarados también se define en la norma y se muestra en la siguiente Tabla 3:

**Tabla 3.** Diferencia permitida en los valores de concentración de emisiones de contaminantes para los fluidos referencia y límites permitidos en la realización del “drift check”. Fuente: R(EU) 2018/1832

| <i>Permissible analyser drift over a PEMS test</i>  |                                  |   |
|---|----------------------------------|---|
| Pollutant   | Absolute Zero response drift     | Absolute Span response drift <sup>(1)</sup>                               |
| CO <sub>2</sub>   | ≤ 2000 ppm per test              | ≤ 2 % of reading or ≤ 2000 ppm per test, whichever is larger              |
| CO  | ≤ 75 ppm per test                | ≤ 2 % of reading or ≤ 75 ppm per test, whichever is larger                |
| NO <sub>x</sub>   | ≤ 5 ppm per test                 | ≤ 2 % of reading or ≤ 5 ppm per test, whichever is larger                 |
| CH <sub>4</sub>   | ≤ 10 ppm C <sub>1</sub> per test | ≤ 2 % of reading or ≤ 10 ppm C <sub>1</sub> per test, whichever is larger |
| THC   | ≤ 10 ppm C <sub>1</sub> per test | ≤ 2 % of reading or ≤ 10 ppm C <sub>1</sub> per test, whichever is larger |
| <sup>(1)</sup> If the zero drift is within the permissible range, it is permissible to zero the analyser prior to verifying the span drift. |                                  |   |

Por otro lado, también se realiza una calibración del módulo de medición de partículas para establecer el cero de dicha medición. Esta calibración se realiza de forma distinta a como se realiza con el analizador de gases. En este caso se usa un filtro HEPA, que es básicamente un recipiente estanco con una concentración cercana a 0 partículas por metro cúbico y que permite establecer ese valor como el cero del sistema de medición de PN. Para la aceptación del valor de calibración de PN, el valor leído debe ser inferior a 0.5 partículas por cm<sup>3</sup>.

### 1.2.4 “DRIFT CHECK”

La etapa post-ensayo para asegurar la veracidad del equipo y que el equipo ha medido de forma correcta durante el ensayo es el denominado “drift check”. En esta etapa se sigue el mismo procedimiento que en la etapa de la calibración, pero sin establecer esos valores como los ceros absolutos del sistema. Lo que se busca es corroborar que los valores de concentración de los fluidos conocidos mencionados anteriormente son realmente los que el equipo mide. En este caso, también se permite que la lectura difiera de los valores reales respetando los límites establecidos en la Tabla 3.

Al igual que se realiza en la calibración, también se debe comprobar que la medición del número partículas se puede tomar como bueno, en este caso volviendo a medir el mismo filtro HEPA medido anteriormente durante la calibración. La diferencia entre el valor leído posteriormente a la realización del ensayo y el valor de calibración establecido antes de la realización de este no debe diferir en más de 0,5 partículas por cm<sup>3</sup>.

Como es de suponer, en la normativa a la que se hace referencia se definen muchos otros aspectos y conceptos de gran importancia por lo que a medición de emisiones se refiere, pero que no son aplicables al objeto de estudio de este trabajo.

Por otro lado, se encuentra la regulación de emisiones a nivel europeo en la que se definen los límites permitidos de emisiones para los vehículos actuales, tanto gasolina como diésel, dependiendo de su categoría. Estos valores límite se encuentran definidos en la normativa actual, llamada Euro 6d-TEMP, a la espera de la llegada de la Euro 6d definitiva cuya entrada en vigor está prevista en septiembre de 2020.

Las normativas Euro regulan las emisiones de monóxido de carbono, hidrocarburos sin quemar y las partículas que se producen al quemar el combustible, así como los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) que se producen por la combustión a altas temperaturas. Los valores definidos en dicha normativa se muestran en la Tabla 4 adjunta.

Tabla 4. Valores límite de emisiones permitidas. Fuente: Delphi Technologies.

#### EUROPEAN UNION

##### EURO 5-6

| Emissions  | Unit  | PC M <sup>1)</sup> , LCV N1 CL 1 |                    |                          | LCV N1 CL 2 |                    |                          | LCV N1 CL 3, N2 |                    |                          |
|--|-------|----------------------------------|--------------------|--------------------------|-------------|--------------------|--------------------------|-----------------|--------------------|--------------------------|
|  |       | Euro 5a                          | Euro 5b/b+         | Euro 6b, 6c, 6d-Temp, 6d | Euro 5a     | Euro 5b/b+         | Euro 6b, 6c, 6d-Temp, 6d | Euro 5a         | Euro 5b/b+         | Euro 6b, 6c, 6d-Temp, 6d |
| <b>EURO 5-6 Positive ignition emissions limits ((EC) 715/2007 as amended (EC) 692/2008)</b>    |       |                                  |                    |                          |             |                    |                          |                 |                    |                          |
| THC  | mg/km | 100                              | 100                | 100                      | 130         | 130                | 130                      | 160             | 160                | 160                      |
| NMHC   |       | 68                               | 68                 | 68                       | 90          | 90                 | 90                       | 108             | 108                | 108                      |
| NO <sub>x</sub>  |       | 60                               | 60                 | 60                       | 75          | 75                 | 75                       | 82              | 82                 | 82                       |
| CO   |       | 1000                             | 1000               | 1000                     | 1810        | 1810               | 1810                     | 2270            | 2270               | 2270                     |
| PM <sup>2)3)</sup>   |       | 5.0                              | 4.5                | 4.5                      | 5.0         | 4.5                | 4.5                      | 5.0             | 4.5                | 4.5                      |
| PN <sup>3)3)</sup>   | Nb/km | –                                | –                  | 6x10 <sup>11 4)</sup>    | –           | –                  | 6x10 <sup>11 4)</sup>    | –               | –                  | 6x10 <sup>11 4)</sup>    |
| <b>EURO 5-6 Compression Ignition emissions limits ((EC) 715/2007 as amended (EC) 692/2008)</b> |       |                                  |                    |                          |             |                    |                          |                 |                    |                          |
| NO <sub>x</sub>  | mg/km | 180                              | 180                | 80                       | 235         | 235                | 105                      | 280             | 280                | 125                      |
| HC+NO <sub>x</sub>   |       | 230                              | 230                | 170                      | 295         | 295                | 195                      | 350             | 350                | 215                      |
| CO   |       | 500                              | 500                | 500                      | 630         | 630                | 630                      | 740             | 740                | 740                      |
| PM <sup>1)</sup>   |       | 5.0                              | 4.5                | 4.5                      | 5.0         | 5.0                | 4.5                      | 5.0             | 5.0                | 4.5                      |
| PN <sup>1)</sup>   | Nb/km | –                                | 6x10 <sup>11</sup> | 6x10 <sup>11</sup>       | –           | 6x10 <sup>11</sup> | 6x10 <sup>11</sup>       | –               | 6x10 <sup>11</sup> | 6x10 <sup>11</sup>       |

1) For compression ignition only: exempted M1 vehicles have to comply w/ N1 CL3 test I limits.  
No more exemption for pass cars for Euro 6.  
2) Test procedure defined in UN Reg 83 Suppl 7.

3) Applicable to PI DI engines only.  
4) Until 3 years after the dates for TA/FR particle emission limit of 6\*E12 may be applied for Euro 6b positive ignition DI vehicles upon request of manufacturer.

Cabe destacar que con la evolución de las normativas Euro, se toma como referencia un contaminante distinto en cada evolución y se le “ataca” reduciendo los límites permitidos. Como se puede observar en las últimas evoluciones, el foco se ha puesto en la emisión de partículas, estableciendo un límite para el número de ellas (PM) y reduciendo la masa emitida permitida de éstas.

### 1.3 MONÓXIDO DE CARBONO

El monóxido de carbono (CO) es un gas invisible e inodoro pero muy tóxico para humanos y animales. Entre otros síntomas, el CO provoca dolor de cabeza, mareo, debilidad, náusea, dolor de pecho y puede llegar a ser mortal si se acumula en pequeños espacios como habitaciones o garajes (Centro de control y prevención de enfermedades (E.E.U.U), 2004). El CO se produce en la combustión de materiales combustibles como gas, gasolina, queroseno, carbón, petróleo o madera. Los vehículos, las chimeneas, las calderas, los calentadores de agua o calefones y los aparatos domésticos que queman combustible producen CO.

Si se observa la Tabla 4 adjunta en el apartado anterior y se comparan los límites permitidos de todos los contaminantes que en ella aparecen, destaca el hecho de que el contaminante más nocivo para el humano es aquel al que menos se le exige, o dicho de otro modo, al que más emisiones se le consienten, permitiendo que un vehículo emita 1000 mg/km de CO (Delphi Technologies, 2020 - 2021).

Por este motivo se pretende desarrollar un sensor para realizar una medición constante de las concentraciones de CO que se emiten durante el funcionamiento de un vehículo y poder así proponer un sistema de mejora para reducir las emisiones de dicho contaminante.

### 1.4 BASES TEÓRICAS DEL SENSOR

Teniendo en cuenta la situación anteriormente expuesta, se va a desarrollar un sistema de medición portátil basado en el reglamento descrito en apartados previos y así poder facilitar las posibles labores de homologación en futuros escenarios.

Para este trabajo, de cara a implementar el sensor comentado anteriormente en el grupo electrógeno y posteriormente en otros motores, se ha decidido utilizar *Arduino*. Esta plataforma de código abierto es un conjunto de hardware y software de fácil uso y al alcance de todos los públicos. La utilización de *Arduino* se debe a que este trabajo es un proyecto final de máster y los recursos no son ilimitados. Permite conseguir resultados con un precio ajustado.

Utilizando cualquier sistema operativo (Windows, Macintosh OSX o Linux) se diseña un programa que se traslada y carga en la placa (*Arduino "board"*) usando un cable de tipo USB. El software de Arduino es un entorno de desarrollo integrado (IDE, por sus siglas en inglés) que usa el lenguaje de programación Java y está basado en programación por procedimientos, es decir, se basa en la repetición de un procedimiento o función constituido por muy pocas expresiones. Los IDE son muy comunes porque son muy fáciles de utilizar, ya que incluyen, como su nombre indica, todas las herramientas para el desarrollo de éste (Red Hat, 2020):

- Editor de código fuente: editor de texto en el cual es posible desarrollar el código del programa en el que se está trabajando y que cuenta con herramientas visuales e indicaciones para facilitar su escritura.
- Automatización de compilación local: para poder usar este código escrito, el IDE compila el programa del código fuente del PC al lenguaje objetivo o código máquina de manera automatizada, además de ejecutar pruebas.
- Depurador: permite probar los programas y encontrar errores en el código desarrollado.

Tras integrar el programa en la placa, es ésta la que recibe la información de los sensores y según lo leído, efectúa una u otra acción a través de sus salidas. En el caso tratado, son los sensores de gases los que envían la información a la placa y ésta la que analiza los datos, los trata y, posteriormente, envía la lectura correspondiente a la pantalla LCD implementada o la salida escogida por el programador.

En este caso, para poder ver las mediciones en tiempo real y poder analizar los resultados de la mejor manera posible, se han escogido dos formas de visionar los datos: la primera es el monitor serial (*"Herramientas – Monitor Serie"*) en el cual se pueden ver los resultados numéricos por escrito, usando el formato deseado y la segunda es el gráfico serial (*"Herramientas – Serial plotter"*) que permite ver las lecturas de una manera más visual mediante un gráfico con los resultados.

## CAPÍTULO 2: DISEÑO DEL SENSOR

Con la finalidad de poder controlar el máximo de variables posibles dentro del estudio de mejora, se ha decidido hacer uso de más de un sensor. Esto permitirá obtener más información acerca de los resultados y así ser más precisos a la hora de sacar conclusiones acerca del proyecto.

### 2.1 SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD

Con el fin de conocer las condiciones del entorno en el momento y lugar en el que se realizan las pruebas, se ha decidido instalar un sensor de temperatura y humedad relativa de bajo coste (DHT11).

Tabla 5. Intervalos de trabajo de un DHT11. Fuente: Diotronic S.A.

| Parámetro        | DHT11 (Rango) | Ud.  |
|------------------|---------------|------|
| Temperatura      | 0 – 50 ± 2    | [°C] |
| Humedad relativa | 20 – 90 ± 5   | [%]  |
| Muestraje        | 1             | [Hz] |
| Voltaje          | 3 – 5,5       | [V]  |

Además de las condiciones de contorno, al trabajar con hidrógeno, es relevante conocer el aumento del vapor de agua proveniente de la combustión de éste. Para eso, este sensor es muy útil puesto que permite conocer tanto variables de ensayo como datos empíricos útiles para obtener resultados y conclusiones.

Se puede encontrar la disposición del sensor en la placa de Arduino, sus conexiones y código en el ANEXO 1.

### 2.2 SENSOR DE MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

En apartados anteriores se ha hablado de la gran necesidad que supone la disminución de emisiones de monóxido de carbono. El hecho de que sea invisible al ojo humano e inodoro lo hacen, si cabe, más peligroso. Además, la elección de la medición de este gas también está muy ligada a la mayor facilidad de conseguir un sensor compatible con Arduino y con un rango útil de medición que en el caso de otros gases.

El sensor que se ha utilizado para obtener información acerca la concentración de este gas es del tipo MQ-7 (Tabla 6), un sensor que se usa en sistemas de control de calidad del aire y es muy funcional, ya que es pequeño, práctico y fácil de utilizar. Este tipo de sensores, son conocidos como electroquímicos ya que, a partir de un cambio químico en el ambiente o espacio a medir, envían una respuesta eléctrica de diferente intensidad. El funcionamiento de estos sensores no es muy complejo y, debido a su extendido uso en muchas industrias y a que utilizan instrumentación muy común en laboratorios, su precio ha disminuido mucho en los últimos tiempos. (Alegret, del Valle, & Merkoçi, 2004)

Tabla 6. Intervalos de trabajo de un MQ-7. Fuente: Sensorae.

| Parámetro                   | MQ-7 (Rango) | Ud.   |
|-----------------------------|--------------|-------|
| Temperatura de trabajo      | -10 - 50     | [°C]  |
| Humedad relativa de trabajo | 0 – 90       | [%]   |
| Rango detectable            | 20 - 2000    | [ppm] |
| Voltaje DC                  | 5            | [V]   |

En general, los sensores electroquímicos consisten en un electrodo de trabajo, un contraelectrodo y un electrodo de referencia, que se encuentran dentro de la carcasa del sensor, en contacto con un líquido

electrolítico y funcionan de la siguiente manera: cuando el gas en cuestión se propaga hasta llegar al electrodo de trabajo, se produce una oxidación o una reducción (en este caso, con el CO, se produce oxidación). Debido a, en este caso, la oxidación, se produce un flujo de electrones desde el electrodo de trabajo hacia el contraelectrodo, a través del circuito exterior (Figura 5). Este flujo provoca una corriente eléctrica proporcional a la concentración de gas detectada, amplificada y leída por los instrumentos y permite cuantificar los datos necesarios. (Industrial Scientific, 2020)

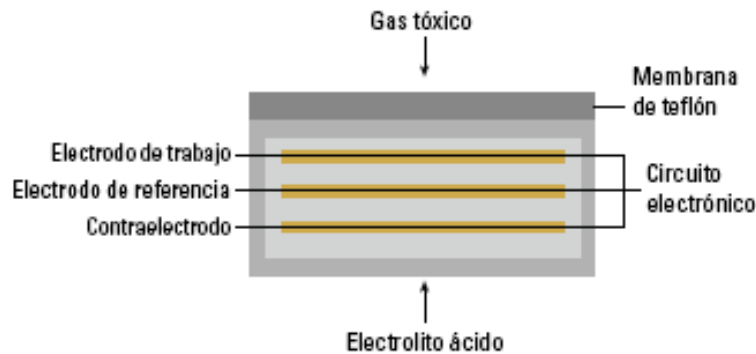


Figura 5. Esquema de un sensor electroquímico. Fuente: Industrial Scientific

Se puede encontrar la disposición del sensor en la placa de Arduino, sus conexiones y código en el ANEXO 2.

### 2.3 SENSOR DE HIDRÓGENO (H<sub>2</sub>)

Para llevar a cabo las pruebas de este trabajo se va a inyectar hidrógeno en el motor seleccionado y es necesario conocer la cantidad de este gas que no se está combustingando durante el ciclo. Con este fin, se ha decidido usar un sensor de la misma familia que el anterior, el MQ-8. Al tratarse de un sensor de la misma familia de sensores electroquímicos, tiene el mismo sistema de funcionamiento que se ha explicado en el apartado anterior (2.2). Este sensor se va a colocar junto al sensor de monóxido de carbono en la salida del escape del grupo electrógeno y, al igual que el anterior, es un sensor de tamaño pequeño y fácil de usar y por tanto, muy indicado para este proyecto.

Tabla 7. Intervalos de trabajo de un MQ-8. Fuente: Hanwei electronics CO., LTD.

| Parámetro                   | MQ-8 (Rango) | Ud.   |
|-----------------------------|--------------|-------|
| Temperatura de trabajo      | -10 - 50     | [°C]  |
| Humedad relativa de trabajo | 0 - 95       | [%]   |
| Rango detectable            | 100 - 10000  | [ppm] |
| Voltaje DC                  | 5            | [V]   |

Se puede encontrar la disposición del sensor en la placa de Arduino, sus conexiones y código en el ANEXO 3.



## 2.4 CAUDALÍMETRO

Dada la necesidad de conocer la cantidad de hidrógeno que se inserta en el motor del grupo electrógeno, para conocer la afectación que esta tiene sobre las emisiones del mismo, es necesario instalar un sensor de caudal entre el ciclo de electrólisis y el motor en cuestión. La colocación de un caudalímetro antes del motor y un sensor de gas (H<sub>2</sub>) a la salida de éste se ha considerado lo más indicado en cada caso debido a sus rangos de trabajo. La utilización del sensor YF-S401, compatible con Arduino, se justifica por su facilidad de uso y porque cumple con las especificaciones necesarias, que son las siguientes:

Tabla 8. Intervalos de trabajo de un MQ-8. Fuente: Naylamp mechatronics.

| Parámetro                     | YF-S401 (Rango) | Ud.     |
|-------------------------------|-----------------|---------|
| Temperatura de trabajo        | -25 – 80        | [°C]    |
| Temperatura máxima del fluido | 60              | [°C]    |
| Humedad relativa de trabajo   | 35 – 90         | [%]     |
| Rango detectable              | 0,3 – 6 ± 5%    | [L/min] |
| Voltaje DC                    | 5 – 18          | [V]     |

Este sensor trabaja haciendo pasar el caudal a través de su cuerpo, en el cual se encuentra una hélice con un imán. El imán en cuestión genera un pulso positivo cada vez que pasa por el sensor de efecto Hall y, de esta manera, se puede calcular el caudal en base a las revoluciones por minuto a las que gira la turbina.

Se puede encontrar la disposición del sensor en la placa de Arduino, sus conexiones y código en el ANEXO 4.

## 2.5 INTEGRACIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN

El hecho de medir datos por separado puede ser útil en ciertos estudios, pero en el caso de este trabajo es necesario conocer todos estos datos de forma simultánea y con una relación en el tiempo para determinar variaciones y posibles desviaciones. Por ello, tras haber programado todos los sensores por separado, estos se deben unir en una misma placa Arduino y un mismo código. Para ilustrar esto se ha creado una figura (Figura 6) y su correspondiente código que se pueden encontrar en el ANEXO 5.

Con la finalidad de implementar el sistema de medición en el motor base de este estudio se deben diseñar dos elementos clave para la implementación de dicho sistema.

El primero de ellos es la “caja” que almacenará los dos componentes principales de hardware: la CPU de Arduino y la Protoboard. Para el diseño de este elemento se ha tenido en cuenta que desde la Protoboard deben salir los cables hacia los distintos sensores ubicados en sus respectivas localizaciones, así como la cercanía necesaria entre Protoboard y CPU, para garantizar la correcta conexión entre dispositivos y asegurar que no se desconecte ningún cable accidentalmente.

Esta “caja” se fabricará a partir de un plástico reutilizado mediante un proceso de impresión en 3D. La razón por la que se ha decidido usar este material, así como este método de fabricación, es que, al tratarse del desarrollo de un proyecto con fines medioambientales, los materiales empleados sean respetuosos con el medioambiente.

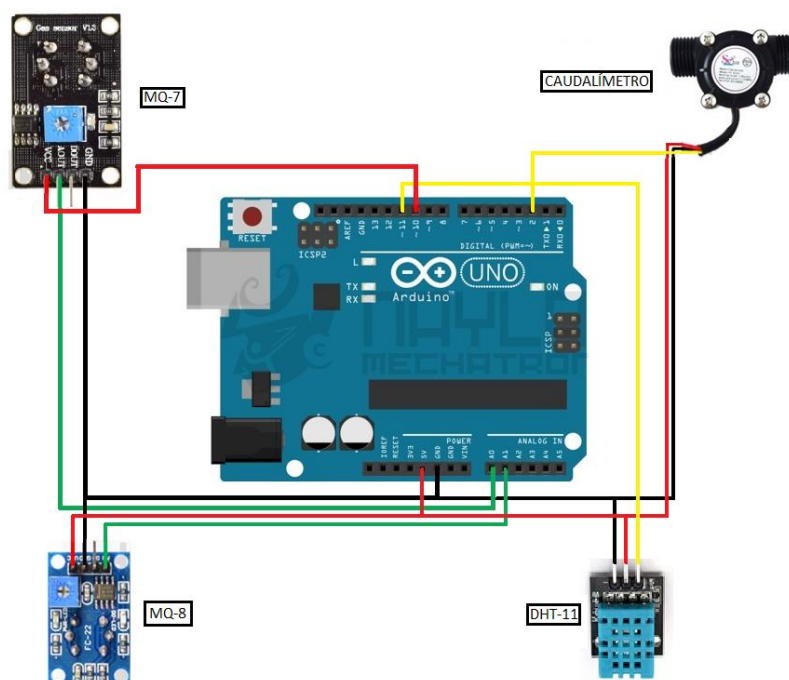


Figura 6. Vista general de la disposición de los sensores. Fuente: propia.

El segundo elemento de vital importancia para la instalación del sistema de medición es el tubo donde irán ubicados los sensores relativos a la medición de monóxido de carbono e hidrógeno. Este tubo, de uso universal debe albergar dos ranuras para poder instalar los sensores y permitirá realizar la medición en cualquier motor, siempre y cuando se realice una adaptación desde el tubo de escape del motor o vehículo a medir, hasta el tubo anteriormente descrito.

El material a emplear para la elaboración de este tubo debe ser acero inoxidable para que, si se pretende instalarlo en vehículos para realizar mediciones en conducción real, este no sufra las posibles inclemencias meteorológicas reduciendo su vida útil por la aparición de corrosión.

En este proyecto se ha realizado un primer diseño de “caja” para albergar lo inicialmente comentado (Figura 7). En el caso del tubo para los sensores de escape se ha decidido no dimensionar ningún tipo de aparato, ya que éste depende totalmente de los sensores utilizados y, como se comentará más adelante, todavía no se han encontrado ni implementado los óptimos para los fines buscados

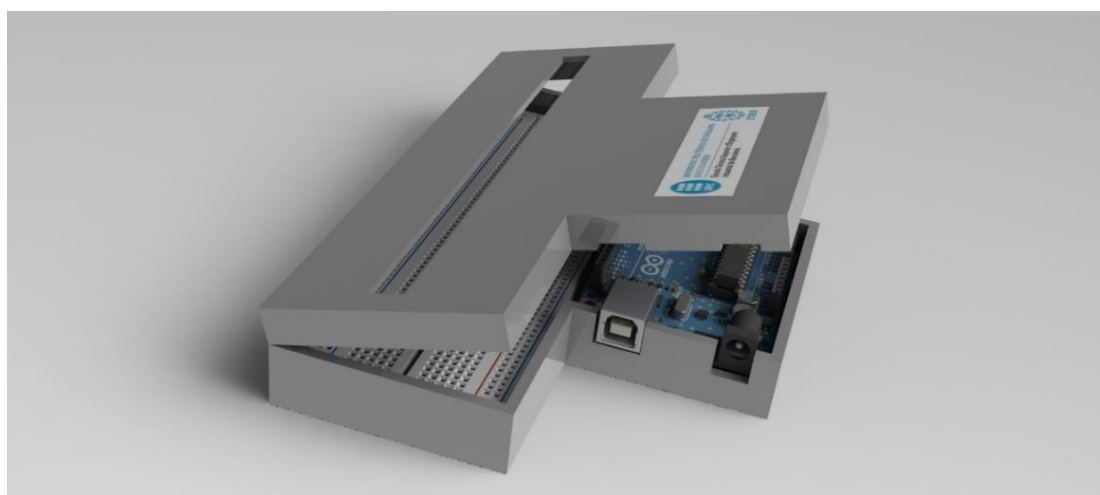


Figura 7. Caja de Arduino.

## CAPÍTULO 3: INTRODUCCIÓN TEÓRICA DE LA INYECCIÓN DE HIDRÓGENO

### 3.1 ANTECEDENTES Y ACTUALIDAD

En la convención COP21 celebrada en París en 2015, 195 países acordaron mantener el calentamiento global con un límite de 2 grados centígrados por encima de los valores de temperatura de la era preindustrial. Para alcanzar esta cifra el mundo necesita reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 60% en el año 2050.

Dos años después del acuerdo de París, en el COP23 celebrado en Bonn, el Consejo del hidrógeno, un consorcio de 18 compañías de distintos sectores entre las cuales se encuentra el sector de la automoción, presentaron su visión sobre cómo puede el hidrógeno contribuir a alcanzar los niveles establecidos para 2050. Este consejo determinó que, si se llevan a cabo esfuerzos considerables para desarrollar tanto en infraestructura como en industria, el hidrógeno podría significar una reducción del 20% de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el año 2050 (Bernd Heid, 2017).

El hidrógeno puede desempeñar muchos papeles importantes en el ámbito de la transición energética y entre ellos destaca el rol de descarbonizar el transporte (Figura 8).

El sector del transporte actual depende en gran medida de los combustibles fósiles y es el responsable del 20% de las emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel mundial. Los vehículos impulsados por hidrógeno, con su alto rendimiento y con la ventaja de que estos pueden recargarse de combustible de forma rápida, pueden ser un buen complemento a las baterías de los vehículos eléctricos.

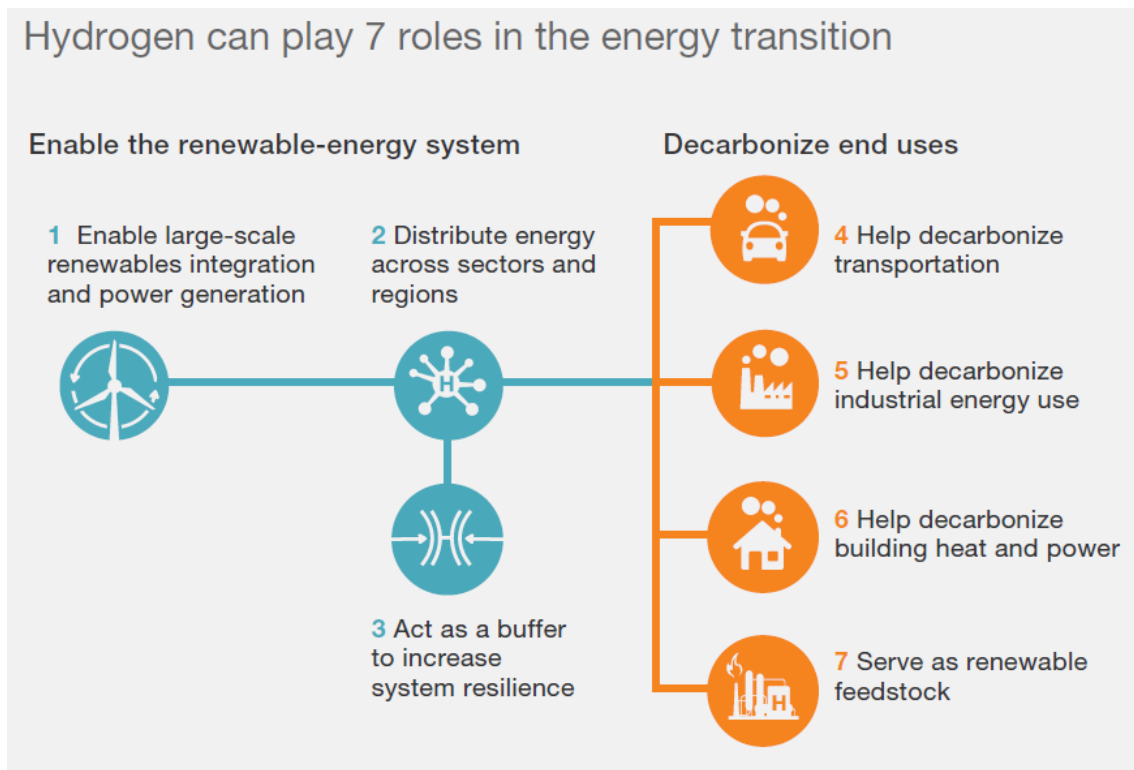


Figura 8. Papeles que puede jugar el hidrógeno en la transición energética. Fuente: McKinsey & Company, 2017.

Los miembros del Consejo del hidrógeno creen que en 2050 los vehículos impulsados por celdas de hidrógeno podrían constituir el 20% del parque automovilístico, lo cual se traduciría en unos 400 millones de coches, entre 15 y 20 millones de camiones y alrededor de 5 millones de autobuses. En lo que a vehículos de larga distancia se refiere (camiones), este porcentaje podría ser incluso superior llegando a

alcanzar el 30% del parque automovilístico (Hydrogen Council, 2020). Al final, estas cifras se traducirían en una reducción del consumo de barriles de petróleo de alrededor de 20 millones de barriles por día.

Los sistemas de propulsión basados en pilas de combustible de hidrógeno (Fuel Hydrogen Cell) son un buen complemento para los vehículos eléctricos y son un buen acompañante para ayudar a las baterías a descarbonizar el transporte. Los vehículos eléctricos exhiben una mayor eficiencia de combustible en general, siempre que no sean demasiado pesados debido a las grandes baterías, lo que las hace ideales para distancias cortas y vehículos ligeros. El hidrógeno puede almacenar más energía en menos peso, lo que hace que las celdas de combustible sean adecuadas para vehículos con cargas pesadas y grandes distancias.

Los vehículos eléctricos con batería (BEV) y los vehículos eléctricos de celda de combustible (FCEV) no solo no compiten, sino que el éxito creciente de los BEV en realidad puede impulsar a los FCEV. Ambas tecnologías se benefician de la aceptación de la movilidad eléctrica y su crecimiento reduce los costes de transmisiones eléctricas y otros componentes. Los expertos de la industria creen que el coste total de propiedad de los vehículos BEV y FCEV podría converger en la próxima década y ser competitivos con los vehículos con motor de combustión interna (ICE) dentro de 12 o 15 años.

Basado en sus ciclos de vida completos, los FCEV logran emisiones de CO<sub>2</sub> muy bajas, en parte porque no requieren baterías grandes cuya producción sea intensiva en energía y recursos. Incluso cuando Los FCEV usan hidrógeno obtenido a partir del gas natural, emiten entre un 20 y un 30% menos de CO<sub>2</sub> que los vehículos propulsados por motores de combustión interna. En realidad, los vehículos propulsados por hidrógeno ya producen menos CO<sub>2</sub> gracias a que varias estaciones de reabastecimiento obtienen su suministro de hidrógeno del proceso de electrólisis mediante electricidad renovable.

Actualmente la comercialización de vehículos de pila de combustible ya se está realizando en muchos países como por ejemplo Japón, Corea del Sur, Estados Unidos y Alemania entre otros. En estos lugares se comercializan hasta tres modelos FCEV (Honda Clarity, Hyundai ix35/Tucson Fuel Cell y Toyota Mirai) y para este año 2020 estaban previstas hasta 10 nuevas incursiones en el mercado (Bernd Heid, 2017). Uno de los vehículos que se comercializa en estos países y que actualmente está empezando a comercializarse en más regiones del mundo es el Hyundai NEXO, un vehículo FCEV con una autonomía de 600km y una potencia de 163cv (Hyundai Motor España, 2020).

Cuando se habla de vehículos impulsados por hidrógeno, no solo existen los FCEV, sino que existe la posibilidad de transformar un vehículo ICE “convencional” en un vehículo ICE alimentado por hidrógeno, tal y como ya demostró BMW con el BMW Hydrogen 7, también conocido como 760h. Este vehículo estaba dotado de un motor V12 de 6.0 litros alimentado por hidrógeno y con la posibilidad de trabajar también con gasolina.

La marca alemana desarrolló este prototipo en el año 2006, y era el primer vehículo al cual se incorporaba un sistema de propulsión basado en la combustión de hidrógeno. Lo interesante de ese vehículo era que estaba diseñado para funcionar con gasolina e hidrógeno indistintamente, lo que le hacía muy versátil. BMW optó por usar el bloque motor más grande de la gama, el V12 de 6.0 litros con una potencia de 445cv, cuando funcionaba con gasolina ya que, al funcionar con hidrógeno se esperaba una pérdida de potencia considerable, y así fue. El motor de combustión interna generaba sólo 260cv cuando funcionaba con hidrógeno.

El almacenaje del hidrógeno en este caso se realiza en estado líquido en un depósito de unos 170 litros, y un peso de 8 kilogramos aproximadamente, ofreciendo una autonomía de alrededor de 200km. Con el precio del hidrógeno de la época, 2006, el coste de recorrer un kilómetro con este vehículo era de 0,32€/km y lo más positivo, emitiendo agua por el tubo de escape.

La temperatura de almacenaje del hidrógeno, para almacenarlo en estado líquido, era de unos  $-253^{\circ}\text{C}$ . BMW defiende que almacenar el hidrógeno en estado líquido tiene la ventaja que ofrece un 75% más de energía por volumen que si este se almacena en estado gaseoso a 700 bares de presión (Juan Manuel Pichardo, 2006).

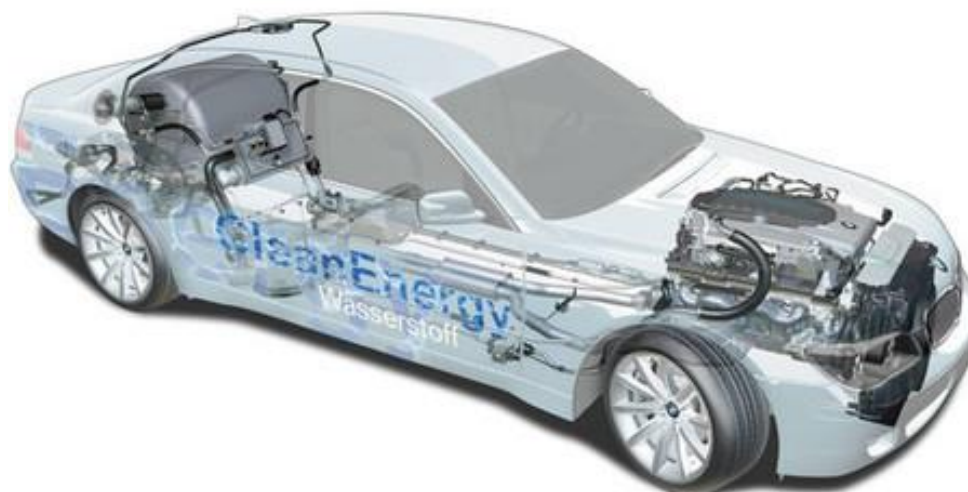


Figura 9. Esquema del BMW Hydrogen 7. Fuente: Motorpasión.

Iniciativas como el BMW H2R o el BMW 750h, entre otras, son las que han provocado que este trabajo tome la orientación que ha tomado, intentando hibridar ambos combustibles para obtener el beneficio que ambos presentan, y poder así hacer la transición hacia los vehículos FCEV, así como la transición energética, de forma más limpia y evitando seguir contaminando el planeta como hasta la fecha.

### 3.2 BASES TEÓRICAS DE LA INYECCIÓN DE HIDRÓGENO

Con la finalidad de entender el motivo de la futura apuesta del sector de la automoción por el hidrógeno, se va a presentar dicho elemento, así como sus características principales, realizando al mismo tiempo una comparativa con la gasolina para tener una idea sobre los teóricos beneficios y desventajas que el hidrógeno presenta y el porqué de su uso, así como las modificaciones que se deben tener en cuenta para poder implementar un sistema de inyección de hidrógeno en un motor de combustión interna.

El hidrógeno tiene, en condiciones normales, una densidad de  $0,0899\text{ kg/m}^3$  frente a los  $730\text{ kg/m}^3$  de la gasolina, y un PCI de  $120011\text{ kJ/kg}$  frente a los  $43950\text{ kJ/kg}$  de la gasolina. Es decir que el hidrógeno es mucho menos denso que la gasolina, pero tiene hasta tres veces más PCI.

Tabla 9. Propiedades físicas de la Gasolina. Fuente: EERC.

TABLA 3.3: PODER CALORIFICO DE COMBUSTIBLES LIQUIDOS

| Combustible               | PCI<br>kJ/kg | PCS<br>kJ/kg | Combustible             | PCI<br>kJ/kg | PCS<br>kJ/kg |
|---------------------------|--------------|--------------|-------------------------|--------------|--------------|
| Aceite de esquistos       | -----        | 38830        | Fuel-oil nº1            | 40600        | 42695        |
| Alcohol comercial         | 23860        | 26750        | Fuel-oil nº2            | 39765        | 41860        |
| Alquitrán de hulla        | -----        | 37025        | Gasóleo <sup>1)</sup>   | 42275        | 43115        |
| Alquitrán de madera       | 36420        | -----        | Gasolina <sup>2)</sup>  | 43950        | 46885        |
| Etanol puro <sup>4)</sup> | 26790        | 29720        | Petroleo bruto          | 40895        | 47970        |
| Metanol <sup>4)</sup>     | 19250        | -----        | Queroseno <sup>3)</sup> | 43400        | 46500        |

<sup>1)</sup> Densidad a  $15^{\circ}\text{C}$ ,  $850\text{ kg/m}^3$

<sup>2)</sup> Densidad a  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $730\text{ kg/m}^3$

<sup>3)</sup> Densidad a  $15^{\circ}\text{C}$ ,  $780\text{ kg/m}^3$

<sup>4)</sup> Densidad a  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $790\text{ kg/m}^3$

Tabla 10. Propiedades físicas del hidrógeno. Fuente: EERC.

TABLA 3.4: PODER CALORIFICO DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

| Combustible     | Densidad<br>kg/m <sup>3</sup> | PCI<br>kJ/kg | PCS<br>kJ/kg | Combustible           | Densidad<br>kg/m <sup>3</sup> | PCI<br>kJ/kg | PCS<br>kJ/kg |
|-----------------|-------------------------------|--------------|--------------|-----------------------|-------------------------------|--------------|--------------|
| Gas natural     | (*)                           | 39900        | 44000        | Gas de agua           | 0'711                         | 14000        | 16000        |
| Gas de hulla    | 0'50                          | 46900        | 46900        | Gas ciudad            | 0'650                         | 26000        | 28000        |
| Gas de coquería | 0'56                          | 31400        | 35250        | Gas de agua carburado | 0'776                         | 26400        | 27200        |
| Gas de aire     | ----                          | 10000        | 12000        | Propano               | 506 (l)<br>1'85 (g)           | 46350        | 50450        |
| Hidrógeno       | 0'0899                        | 120011       | 141853       | Butano                | 580 (l)<br>2'4 (g)            | 45790        | 49675        |

(\*) Varía según el país de procedencia

(l), (g) Densidad a 20 °C en estado líquido y gaseoso, respectivamente.

P.C. Medio del biogás = 5554 kcal/m<sup>3</sup>

Si bien es cierto que el hidrógeno tiene tres veces más PCI, el hecho de que su densidad sea tan inferior a la de la gasolina provoca que la cantidad de aire, entendiendo aire como oxígeno, necesaria para obtener la misma cantidad de energía sea muy superior a la requerida por la gasolina. Teniendo en cuenta este hecho, se plantea la siguiente cuestión: ¿es posible encontrar el punto dónde se pueda sustituir parte del combustible original del motor (gasolina) por hidrógeno sin que tenga esto una gran repercusión en la potencia que ofrece del motor? Esta cuestión es la que se pretende resolver a lo largo de este documento.

Por otro lado, el hecho de que el hidrógeno tenga una menor densidad que la gasolina, y que esto implique una necesidad de insuflar más aire en los cilindros, influye en el porcentaje de combustible que hay dentro de los cilindros, repercutiendo al mismo tiempo en la potencia que el motor ofrece. Esta circunstancia lleva a pensar en la necesidad de implementar un sistema de sobrealimentación con la finalidad de poder insuflar más aire en los cilindros y reducir así la pérdida de potencia producida por la baja densidad del hidrógeno.

Son muchas las propiedades, tanto físicas como químicas, de interés para el correcto desarrollo de este proyecto entre las que destacan: temperatura de autoignición, energía de chispa requerida para ignición, difusividad, índice de octanaje, punto de encendido de la chispa, interacción con otros materiales y presión de trabajo, entre otras muchas que a continuación se van a detallar.

La temperatura de autoignición a presión ambiente del hidrógeno está en torno a los 500°C, mientras que la de la gasolina esta alrededor de los 230-280°C (Verhelst, 2004 - 2005). Este hecho es muy positivo por lo que al uso de hidrógeno respecta, ya que en condiciones de funcionamiento tiene un mayor rendimiento que la gasolina al tolerar mayores temperaturas de trabajo sin sufrir problemas de ignición no controlada.

Si a la característica anterior se le añade el elevado índice de octano<sup>1</sup> que presenta el hidrógeno, de 140 octanos, frente a los 95-98 de la gasolina convencional, el problema de la autoignición o auto-detonación<sup>2</sup> se reduce considerablemente. Este hecho se debería traducir en un aumento significativo del rendimiento del motor de combustión interna, así como en un aumento de las ratios de compresión que el mismo puede alcanzar.

<sup>1</sup> El **índice de octano** es una medida que sirve para evaluar la presión y la temperatura a la que puede ser sometido un combustible mezclado con aire antes de auto-detonar por haber llegado a su temperatura de ignición. Cuanto mayor es el índice de octano, mayores son las temperaturas y presiones que puede soportar el combustible antes de auto-detonar (Sara McAllister, 2011).

<sup>2</sup> La **auto-detonación** es un hecho que se da por la combustión prematura de la totalidad de la mezcla en la cámara de combustión debido a las altas temperaturas y presiones que en esta se generan, hecho que induce al motor a un funcionamiento muy brusco, y muy poco eficiente, donde el pistón trabaja forzado, encontrándose con una fuerza totalmente opuesta en el sentido de su desplazamiento ascendente, haciendo que trabaje a "golpes" en lugar de hacerlo con la suavidad que debería (Manha, 2009).

Por el contrario, la energía de la chispa que se requiere para combustionar el hidrógeno es muy inferior a la de la gasolina, siendo de 0.017mJ y 0.24mJ respectivamente (Verhelst, 2004 - 2005). Este hecho presenta una dificultad añadida y es que, si en el párrafo anterior se comentaba la positiva afectación de la temperatura de ignición y del índice de octano sobre la auto-detonación, la energía de combustión favorece que suceda este fenómeno. Esto supone un gran inconveniente, al que si se le añade la velocidad de propagación que tiene el hidrógeno (muy superior a la de la gasolina), puede representar un problema para hibridar ambos combustibles, teniendo en cuenta que el sistema de ignición no puede funcionar de forma independiente en la cámara de combustión, de tal forma que favorezca la combustión de los dos combustibles que componen la mezcla.

Por otro lado, la difusividad del hidrógeno, mucho más elevada que la de la gasolina, permite que la mezcla de aire combustible sea mucho más homogénea, generando así una combustión más limpia y eficiente.

Por último, la combustión del hidrógeno genera vapor de agua a una temperatura de alrededor de 370°C, mientras que los gases que se generan por la combustión de gasolina no solo son gases contaminantes, sino que además su temperatura es de unos 800°C aproximadamente (Verhelst, 2004 - 2005).

---

### 3.2.1 ¿QUÉ RETOS PLANTEA LA IMPLEMENTACIÓN DE ESTE SISTEMA?

La implementación de un sistema de inyección de hidrógeno presenta distintos retos en términos de adaptación a un motor de combustión convencional (Verhelst, 2004 - 2005):

1. El punto de encendido de las bujías de un motor de combustión interna de gasolina está adelantado unos 8-9 grados. Esto significa que la chispa se enciende 8-9 grados antes de que la cabeza del pistón llegue al PMS. Esto es así debido a una de las propiedades de la gasolina anteriormente comentada: la velocidad de propagación. La velocidad con la que la gasolina se propaga es muy inferior a la del hidrógeno y es por este motivo que el sistema de encendido debe activarse antes de que el pistón llegue al punto más alto de su recorrido con la finalidad de aprovechar al máximo la energía generada por la combustión de gasolina. En cambio, el hidrógeno presenta una mayor velocidad de propagación, haciendo que no sea necesario avanzar el encendido de la chispa para aprovechar al máximo la energía generada por su combustión. Esto supone un gran reto puesto que se pretende hibridar el motor con ambos combustibles y será necesario encontrar el avance perfecto para optimizar las dos combustiones.
2. Los materiales con los que están fabricados los motores térmicos actuales pueden representar un obstáculo para la inyección de hidrógeno ya que algunos de ellos reaccionan con el hidrógeno. El más crítico para la implementación del sistema es el platino que se encuentra en las puntas de las bujías, y que actúa como catalizador del hidrógeno fomentando la autoignición. Se deberá buscar una solución a este reto, sustituyendo las bujías por otras de otro material.
3. La combustión del hidrógeno genera agua. Por cada kilogramo de hidrógeno que se combustione se generan 4 litros de agua, esto genera grandes cantidades de agua que se pueden almacenar en el sistema de escape del motor ICE y que pueden acabar con la vida de este. Es imprescindible rediseñar el sistema de escape con la finalidad de garantizar una correcta evacuación del agua y de los gases de escape.
4. Debido a la baja densidad del hidrógeno, comentada en apartados anteriores, aparece la necesidad de introducir una mayor cantidad de aire en el cilindro para garantizar así que la pérdida de potencia debida al bajo porcentaje de combustible presente en el cilindro sea mínima. Esta carencia se puede solucionar acoplado al sistema de admisión de aire algún tipo de sistema de sobrealimentación con la finalidad de poder introducir mayor cantidad de aire en el cilindro y, consecuentemente, poder quemar más combustible.
5. Un aspecto crítico de introducir hidrógeno en el cilindro de un motor de combustión interna es en lo referente a lubricación y estanqueidad. El hidrógeno es un gas que, a diferencia de la

gasolina, no actúa como lubricante de los componentes internos del mismo. Por ello, se debe tener en consideración todo lo referente a lubricación y estanqueidad, pudiendo existir la posibilidad de que se requiera un rediseño de ciertos componentes del motor con la finalidad de evitar tanto fugas como interacciones con otros fluidos lubricantes, evitando que estos lleven a cabo su función de forma correcta.

### 3.3 CARACTERÍSTICAS DEL GRUPO ELECTRÓGENO

El sistema se ha dimensionado sobre el motor de un grupo electrógeno. La elección de este motor radica en su simplicidad, así como en su coste. Al tratarse de un proyecto cuyo desarrollo requería de una fase experimental, se había optado por realizar las pruebas sobre el motor del grupo electrógeno para posteriormente realizar las modificaciones oportunas sobre un motor de un buggy.

El motor en cuestión es un motor muy sencillo, que dispone de una alimentación por carburación y no tiene catalizador. El no disponer de catalizador es muy favorable para el desarrollo de este proyecto ya que por lo que a la parte del sensor se refiere, permite realizar mediciones de emisiones directas y no una medición “refinada” por un sistema de catalizador. El hecho de que la alimentación sea carburación, por el contrario, dificulta la posibilidad de controlar de forma precisa elementos como el volumen, tanto de aire como de combustible, que se introduce en el cilindro, dificultando así la posibilidad de experimentar de forma exacta.

Tabla 11. Características físicas del motor del grupo electrógeno. Fuente: propia.

| GRUPO ELECTRÓGENO |           |                 |
|-------------------|-----------|-----------------|
| Model             | RAC3100-A |                 |
| Power             | 7,00      | CV              |
| Rated speed       | 3000,00   | rpm             |
| Volume            | 208,00    | cm <sup>3</sup> |
| Bore              | 58,35     | mm              |
| Stroke            | 77,79     | mm              |

Las características relevantes del motor del que se dispone se muestran en la Tabla 11. Teniendo en cuenta que no se conocen todas las características del mismo ya que debido a la pandemia por Covid-19, el taller de la universidad se encuentra cerrado, se ha optado por adaptarlas. Para esto, se ha decidido usar el software “*Lotus engine simulation*” desarrollado por Lotus desde finales de los años 80. Este software permite, mediante su herramienta “*concept builder*”, aportar los datos que sí se conocen sobre el motor y obtener el resto mediante el conocimiento ingenieril y la investigación de la marca Lotus.

Así pues, como se puede ver en la Figura 10, en color morado y mediante el candado, se fijan los valores de los datos que se conocen del motor en cuestión y, automáticamente, el software calcula los valores más adecuados en cuanto a rendimiento para el resto de las características. Por ejemplo, de este motor se conoce la cilindrada, la velocidad de rotación o el número de válvulas de admisión y escape, pero se desconocen muchas otras. Ciertamente es que, para el resto de los cálculos, muchos de estos valores no son necesarios y por tanto no se usarán, pero otros como la longitud y diámetro del cilindro son indispensables. Por esta razón, también se ha asumido que se trata de un motor sub-cuadrado, ya que sus revoluciones por minuto en ningún momento son muy altas.



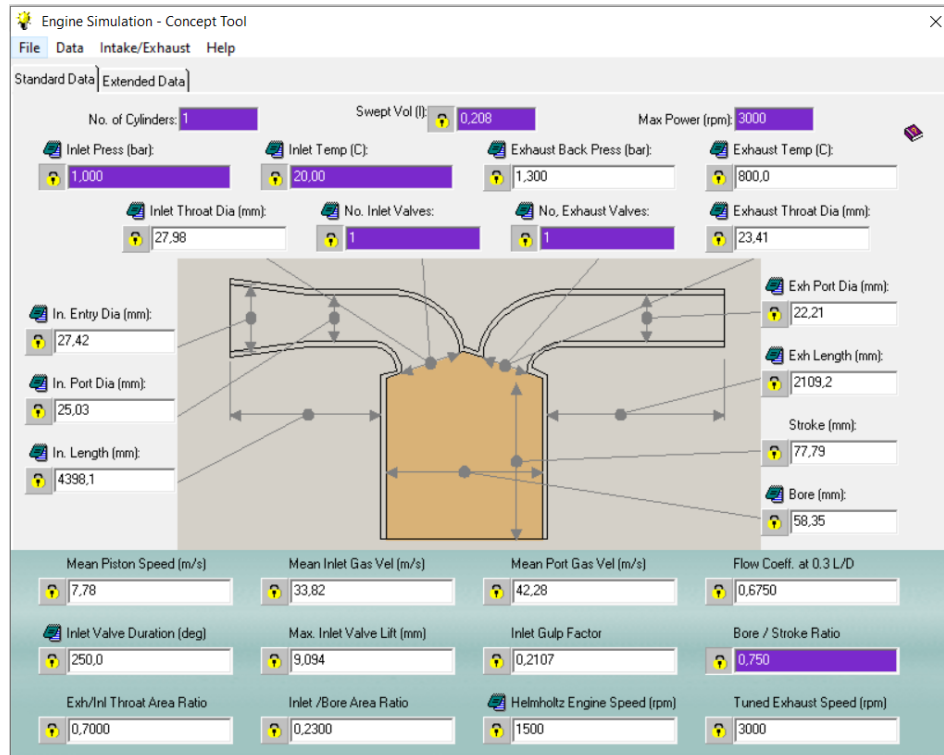


Figura 10. Herramienta "concept builder" del software "Lotus engine simulator. Fuente: propia.

### 3.4 POSIBLES SOLUCIONES A LOS RETOS PLANTEADOS

Conocidas las características técnicas del motor empleado en el desarrollo de este proyecto y los retos que provoca la inyección de hidrógeno, se pretenden plantear las posibles soluciones aplicables al motor del grupo electrógeno.

Durante el desarrollo de este proyecto se intentará dar respuesta a este reto, uno de los más complejos y estudiados en el desarrollo de motores de combustión interna con hibridación de combustibles. Si bien es cierto que una primera aproximación e hipótesis hace pensar que éste será más cercano al PMS, se deberá realizar un estudio para el caso de este proyecto y poder así determinar dicho avance.

Con la finalidad de evitar el efecto catalizador del platino sobre el hidrógeno se propone una solución alternativa a las bujías de punta de platino que consiste en utilizar bujías de punta de iridio. Con estas bujías, no sólo se evita el tener un elemento que interactúa con el hidrógeno a modo de catalizador, sino que, además, la tensión que provoca que el arco salte, es inferior en este tipo de bujías. Esta solución satisface no solo el reto que plantean las bujías actuales, sino también otras necesidades relativas a consumos eléctricos.

En el motor del grupo electrógeno disponible no hay catalizador, con lo que no se requiere de ningún sistema adicional o distinto al actual para evacuar los vapores de agua generados por la combustión de hidrógeno. Pero si bien es cierto que el objetivo de este proyecto era implementar un sistema de inyección de hidrógeno a un vehículo dotado de catalizador, se ha pensado en una posible solución basada en un escape de descenso monótono donde la acumulación de agua sea prácticamente imposible. Aunque el hecho de facilitar la evacuación de agua puede resultar sencillo, el dimensionamiento de un sistema de catalizadores y silenciadores para este tubo de escape es más complejo. Por otro lado, el material a emplear para la elaboración de estos escapes es el acero inoxidable para poder garantizar que el sistema no se oxide y por lo tanto evitar fugas de gases contaminantes a la atmosfera.

En cuanto a la estanqueidad y la lubricación, se requiere de un análisis experimental para determinar la afectación real de la cantidad de hidrógeno que se inyecta al motor y la afectación que esta tiene sobre la lubricación del mismo. Aun así, una solución al reto de la estanqueidad y lubricación podría ser la modificación de la forma de los pistones que, en lugar de tener una forma circular, adoptarían una forma del tipo “faldilla combada”, lo cual favorece la estabilidad del pistón durante los ciclos evitando que se filtre aceite en su interior. Además, se deberían reducir las tolerancias entre camisa y pistón para intentar favorecer esta estanqueidad que el hidrógeno requiere.

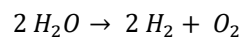
### 3.5 GENERADOR DE HIDRÓGENO

Con la finalidad de inyectar hidrógeno en el motor del grupo electrógeno se ha optado por usar un dispositivo de generación de hidrógeno basado en la electrólisis del agua. El generador del que se dispone tiene un caudal de generación máximo de 95 litros/hora.

Este dispositivo emplea agua para generar hidrógeno y oxígeno. El proceso de separación de las moléculas que componen el agua se realiza mediante la aplicación de voltaje al fluido. Se introducen dos placas cargadas en el fluido, una cargada positivamente y la otra negativamente, de tal forma que la cargada positivamente se encarga de atraer las moléculas de oxígeno, mientras que la cargada negativamente se encarga de atraer las moléculas de hidrógeno.

De esta forma, el generador no solo genera hidrógeno a partir de agua, sino que también genera oxígeno. Con la finalidad de conocer la cantidad de hidrógeno que se inyectará en el motor y poder así efectuar cálculos más aproximados a la realidad, se ha procedido a calcular el porcentaje de hidrógeno que se genera a partir de la electrólisis del agua de la forma que a continuación se detalla.

Conociendo el valor de las masas molares, tanto del hidrógeno como del oxígeno, se procede a calcular, a partir de la reacción estequiométrica del proceso de electrólisis, el volumen de cada uno de los fluidos que se genera por la separación de dos moléculas de agua, según la ecuación (1).



$$V_{HIDRÓGENO} = \frac{mw_{HIDRÓGENO} * \rho_{HIDRÓGENO}}{N_{avogadro}} = \frac{(2 * 2 * 1,008 \frac{grams}{mol}) * (0,0899 \frac{kg}{m^3} * \frac{1 m^3}{1000000 cm^3} * \frac{1000 grams}{1 kg})}{6,023 * 10^{23} \frac{1}{mol}} = 7,44643 * 10^{-20} cm^3 \quad (1)$$

$$V_{OXÍGENO} = \frac{mw_{OXÍGENO} * \rho_{OXÍGENO}}{N_{avogadro}} = \frac{(2 * 15,990 \frac{grams}{mol}) * (1,3310 \frac{kg}{m^3} * \frac{1 m^3}{1000000 cm^3} * \frac{1000 grams}{1 kg})}{6,023 * 10^{23} \frac{1}{mol}} = 3,98922 * 10^{-20} cm^3$$

A partir de los volúmenes calculados con la ecuación (1), se puede obtener el porcentaje de hidrógeno que se generará debido al proceso de electrólisis, tal y como se muestra a continuación:

$$\%_{HIDRÓGENO} = \frac{V_{HIDRÓGENO}}{V_{HIDRÓGENO} + V_{OXÍGENO}} = \frac{7,44643 * 10^{-20}}{7,44643 * 10^{-20} + 3,98922 * 10^{-20}} = 65,116 \% \quad (2)$$

## CAPÍTULO 4: DISEÑO DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DE HIDRÓGENO

Con la finalidad de determinar si la opción de inyectar hidrógeno en el motor del grupo electrógeno es una buena opción para reducir las emisiones que este emite y, a falta de la posibilidad de llevar a cabo un proceso experimental, se ha desarrollado un trabajo teórico para dar respuesta a la hipótesis planteada sobre la influencia de la inyección de hidrógeno.

### 4.1 CÁLCULO ENERGÉTICO

En la primera parte de los cálculos se ha optado por estudiar la influencia del hidrógeno sobre la energía y potencia desarrollada por el motor en cuestión para ver si realmente, a niveles teóricos, la inyección del hidrógeno conlleva una pérdida significativa de la potencia que entrega el motor.

#### 4.1.1 HIPÓTESIS INICIALES

Con el objetivo de obtener unos resultados fiables y lo más cercanos a la realidad posibles y, teniendo en cuenta la complejidad de los modelos reales de los motores de combustión interna, se han realizado ciertas simplificaciones y aproximaciones para realizar este estudio teórico. Algunos aspectos del cálculo pueden provocar que exista un cierto error que, no obstante, es despreciable o asumible.

A continuación, se exponen las hipótesis, suposiciones y aclaraciones realizadas para el desarrollo de este apartado del cálculo:

1. Se ha supuesto una combustión ideal, basada en la reacción estequiométrica de combustión de ambos combustibles.
2. Se ha establecido que la gasolina está compuesta únicamente por octano y que el aire está compuesto por oxígeno y nitrógeno, ya que estos son los elementos con mayor presencia en el aire.
3. Se ha supuesto un rendimiento térmico del motor de un 30%. Se ha tomado este valor ya que es un valor extensamente conocido en el mundo de la automoción.
4. La velocidad nominal del cigüeñal se toma constante para cualquier situación de funcionamiento, tomando el valor de 3000 rpm, valor declarado por el fabricante del grupo electrógeno.
5. Algunos valores calculados dependen de las condiciones atmosféricas del lugar en el que se lleven a cabo las pruebas.

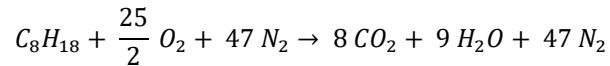
#### 4.1.2 CÁLCULO ENERGÉTICO DE LA COMBUSTIÓN DE AMBOS COMBUSTIBLES

En este primer cálculo se ha estudiado la potencia que entregaría el motor del grupo electrógeno si se convirtiera en un motor alimentado con hidrógeno, para observar si existe una caída de potencia significativa respecto al valor obtenido cuando este funciona con gasolina.

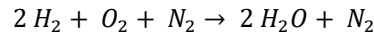
Esta primera aproximación de los cálculos proporcionará una imagen sobre la influencia del combustible en un caso "real", como podría ser un vehículo que dispone de un tanque de hidrógeno y que realiza su combustión mediante la mezcla con aire atmosférico. No es el caso de estudio de este trabajo, pero sirve para tener una primera visión de lo que la implementación de este combustible supondría.

Para realizar los cálculos, se han definido las reacciones de combustión de ambos combustibles, de acuerdo con las hipótesis 1 y 2 anteriormente descritas. Así pues, las reacciones que se han tomado para proceder a la realización de los cálculos para este caso de estudio son las siguientes:

Por lo que a la combustión de la gasolina se refiere:



Para la combustión del hidrógeno:



Con las dos reacciones definidas, se ha procedido al cálculo de la relación aire-combustible para ambos combustibles, basado en la estequiometría de la reacción:

Para el cálculo de la AFR de la gasolina, se ha calculado a partir de la ecuación (3):

$$C_8H_{18} + \left(x + \frac{y}{4}\right) * (O_2 + 3,76 N_2) \rightarrow x CO_2 + \frac{y}{2} H_2O + \left(x + \frac{y}{4}\right) * (3,76 N_2)$$

$$AFR_{GASOLINA} = \frac{4,76 * \left(x + \frac{y}{4}\right) * 28,96}{12 * x + y} = \frac{4,76 * \left(8 + \frac{18}{4}\right) * 28,96}{12 * 8 + 18}$$

$$= 15,115 \frac{kg \text{ Aire}}{kg \text{ Gasolina}}^3 \quad (3)$$

Por lo que al cálculo del AFR del hidrógeno se refiere, se ha procedido al cálculo de las masas molares tanto de combustible (H<sub>2</sub>) como de aire, y posteriormente se ha aplicado la ecuación (4):

$$AFR_{HIDRÓGENO} = \frac{m_{AIRE}}{m_{HIDRÓGENO}} = \frac{n_{AIRE} * mw_{AIRE}}{n_{HIDRÓGENO} * mw_{HIDRÓGENO}} \quad (4)$$

Donde,

*m*: masa

*n*: número de moléculas que intervienen en la reacción

*mw*: masa molar de la molécula

Teniendo en cuenta que la masa molar del oxígeno monoatómico es de 15,99 gramos/mol y que está presente en el aire atmosférico en un 21%; y también que la masa molar del nitrógeno monoatómico es de 14,007 gramos/mol y que este compone el 78% del aire atmosférico, se puede realizar una estimación de la masa molar del aire del siguiente modo:

$$mw_{AIRE} = 2 * mw_{OXÍGENO} + \frac{\%NITRÓGENO \text{ en AIRE}}{\%OXÍGENO \text{ en AIRE}} * 2 * mw_{NITRÓGENO}$$

$$= 2 * 15,99 + \frac{78}{21} * 2 * 14,007 = 137,364 \frac{gramos}{mol} \quad (5)$$

Entonces, sabiendo que la masa molar del hidrógeno monoatómico es de 1,008 gramos/mol, se puede calcular finalmente la relación aire-combustible para el hidrógeno, de acuerdo con las ecuaciones (4) y (5):

$$mw_{HIDRÓGENO} = 2 * mw_{HIDRÓGENO} = 2 * 1,008 = 2,016 \frac{gramos}{mol}$$

$$AFR_{HIDRÓGENO} = \frac{n_{AIRE} * mw_{AIRE}}{n_{HIDRÓGENO} * mw_{HIDRÓGENO}} = \frac{137,364}{2 * 2,016} = 34,068 \frac{kg \text{ Aire}}{kg \text{ Hidrógeno}}$$

<sup>3</sup> Aunque el AFR es un valor adimensional, conceptualmente indica la relación de masa que existe entre el aire y el combustible, es decir, la cantidad de masa de aire necesaria para que combustionen ciertos kilogramos de combustible. Por este motivo se ha optado por atribuirle esta unidad.

Una vez se han calculado las relaciones AFR para ambos combustibles, se procede al cálculo de la potencia de la que se dispondrá mediante el proceso de combustión de ambos combustibles por separado. Para ello se lleva a cabo el mismo procedimiento de cálculo para los dos combustibles por separado, usando el del proceso de combustión de la gasolina como ejemplo.

El primer paso del cálculo consiste en encontrar el volumen tanto de aire como de combustible que se necesita para que la combustión tenga lugar. Conociendo las densidades de ambos fluidos en condiciones normales (20°C y 1atm) y la relación AFR, se determinan dichos valores de acuerdo con las ecuaciones (6) y (7):

$$V_{1kg \text{ GASOLINA}} = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{730 \frac{kg}{m^3}} * \frac{10^6 cm^3}{1 m^3} = 1369,863 cm^3 \quad (6)$$

$$V_{1kg \text{ AIRE}} = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{1,2041 \frac{kg}{m^3}} * \frac{10^6 cm^3}{1 m^3} = 830495,806 cm^3$$

$$V_{15,115kg \text{ AIRE}} = AFR_{GASOLINA} * V_{1kg \text{ AIRE}} = 15,115 * 830495,806 cm^3 = 12553016,958 cm^3 \quad (7)$$

Donde,

$\rho$ : densidad

Con los valores de volumen de combustible y comburente, se procede al cálculo del porcentaje que ocupa cada uno de estos fluidos siguiendo la ecuación (8):

$$\%_{GASOLINA} = \frac{V_{1kg \text{ GASOLINA}}}{V_{1kg \text{ GASOLINA}} + V_{15,115kg \text{ AIRE}}} = \frac{1369,863}{1369,863 + 12553016,958} = 0,0109 \% \quad (8)$$

$$\%_{AIRE} = \frac{V_{15,115kg \text{ AIRE}}}{V_{1kg \text{ GASOLINA}} + V_{15,115kg \text{ AIRE}}} = \frac{12553016,958}{1369,863 + 12553016,958} = 99,9891 \%$$

A partir del porcentaje de ambos fluidos y el valor del volumen del cilindro del motor del grupo electrógeno (208 cm<sup>3</sup>), se puede calcular el volumen de gasolina que habrá en el cilindro según la ecuación (9):

$$V_{in-cyl. \text{ GASOLINA}} = \%_{GASOLINA} * V_{CILINDRO} = \frac{0,0109}{100} * 208 = 0,0227 cm^3 \quad (9)$$

Conociendo el volumen de combustible presente en el cilindro, así como su densidad y el valor del poder calorífico de este, se puede realizar el cálculo energético para posteriormente realizar el cálculo teórico de la potencia que desarrollará el motor:

$$E_{GASOLINA} = PCI * \rho * V_{in-cyl. \text{ GASOLINA}} = 43950 \frac{kJ}{kg} * 730 \frac{kg}{m^3} * 0,0227 cm^3 * \frac{1 m^3}{10^6 cm^3} \quad (10)$$

$$= \mathbf{0,7282 \text{ kJ}}$$

Con el valor de energía calculado según la ecuación (10) y sabiendo que el motor del grupo electrógeno es un motor de 4 tiempos, es decir que tarda dos vueltas en realizar un ciclo entero y que trabaja a una velocidad de 3000 rpm, se puede obtener el valor de potencia desarrollada por el motor, teniendo en cuenta la hipótesis 3 descrita anteriormente y aplicando la ecuación (12):

$$t_{ciclo} = \frac{2 \text{ rev}}{1 \text{ ciclo}} * \frac{1 \text{ minuto}}{3000 \text{ rev}} * \frac{60 \text{ sec}}{1 \text{ minuto}} = 0,04 \frac{\text{sec}}{\text{ciclo}} \quad (11)$$

$$P_{GASOLINA} = \frac{E_{GASOLINA}}{t_{ciclo}} * \eta_{motor} = \frac{0,7282}{0,04} * \frac{30}{100} = 5,4615 \frac{kJ}{sec} \quad (12)$$

Usando el factor de conversión de kJ/s a CV de 1,3596, se obtiene:

$$P_{GASOLINA} = 5,4615 \frac{kJ}{s} * 1,3596 = \mathbf{7,4250 CV}$$

El mismo procedimiento de cálculo aplica al cálculo del hidrógeno, obteniendo un valor de potencia de:

$$P_{HIDRÓGENO} = \mathbf{6,4576 CV}$$

Como se puede observar, la diferencia de potencia que el motor desarrollará con hidrógeno es de alrededor de un 13% menos. Este hecho es muy sorprendente ya que se esperaba que la reducción de potencia ofrecida por el motor sería mucho más significativa.

La hoja de cálculos de este procedimiento se puede encontrar en el ANEXO 6.

#### 4.1.3 CÁLCULO ENERGÉTICO PARA LA HIBRIDACIÓN DE COMBUSTIBLES (PARTE 1)

En este caso se ha estudiado la afectación del hidrógeno sobre el caso de estudio del trabajo, es decir, se ha tenido en cuenta el proceso de generación de hidrógeno del que se dispone, así como el limitante del proceso, el caudal máximo de generación de hidrógeno del dispositivo disponible.

Por otro lado, se ha realizado este cálculo considerando que la inyección de hidrógeno se realizará de forma controlada, o lo que es lo mismo, mediante la implementación de un inyector que permitirá controlar el inicio de inyección, así como la duración de esta.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, se debe recalculer la relación AFR calculada para el hidrógeno ya que este no quemará con el oxígeno presente en el aire atmosférico, sino que lo hará con el oxígeno que proviene de la misma reacción de electrólisis mediante la cual se obtiene el hidrógeno. Por ello se repite el procedimiento de cálculo para determinar dicho coeficiente, de acuerdo a las ecuaciones (4) y (5):

$$mw_{AIRE} = \frac{2 * mw_{OXÍGENO}}{\%_{OXÍGENO \text{ en AIRE}}} = \frac{2 * 15,99}{\frac{21}{100}} = 152,286 \frac{gramos}{mol}$$

$$mw_{HIDRÓGENO} = 2 * mw_{HIDRÓGENO} = 2 * 1,008 = 2,016 \frac{gramos}{mol}$$

$$AFR_{HIDRÓGENO} = \frac{n_{AIRE} * mw_{AIRE}}{n_{HIDRÓGENO} * mw_{HIDRÓGENO}} = \frac{152,286}{2 * 2,016} = \mathbf{37,769} \frac{kg \text{ Aire}}{kg \text{ Hidrógeno}}$$

Con la relación AFR de la combustión del hidrógeno recalculada, se procede a calcular el volumen de cada uno de los combustibles presentes en el cilindro para posteriormente poder realizar el cálculo de potencia.

El primer paso del cálculo, de la misma forma que en el procedimiento anterior, consiste en encontrar el volumen tanto de aire como de cada combustible que se necesita para que la combustión tenga lugar. Para la gasolina estos valores siguen siendo los mismos que los calculados para el caso de estudio anterior (4.1.2):

$$V_{1kg \text{ GASOLINA}} = \frac{1}{\rho_{GASOLINA}} = \frac{1}{730 \frac{kg}{m^3}} * \frac{10^6 cm^3}{1 m^3} = 1369,863 cm^3$$

$$V_{1kg \text{ AIRE}} = \frac{1}{\rho_{AIRE}} = \frac{1}{1,2041 \frac{kg}{m^3}} * \frac{10^6 cm^3}{1 m^3} = 830495,806 cm^3$$

$$V_{15,115kg \text{ AIRE}} = AFR_{GASOLINA} * V_{1kg \text{ AIRE}} = 15,115 * 830495,806 \text{ cm}^3 = 12553016,958 \text{ cm}^3$$

Por lo que al hidrógeno se refiere, al tener una nueva relación AFR, este valor debe recalcularse también, según las ecuaciones (6) y (7) de tal forma que se obtienen los siguientes valores:

$$V_{1kg \text{ HIDRÓGENO}} = \frac{1}{\rho_{HIDRÓGENO}} = \frac{1}{0,0899 \frac{kg}{m^3}} * \frac{10^6 cm^3}{1 m^3} = 1123470,523 \text{ cm}^3$$

$$V_{37,769kg \text{ AIRE}} = AFR_{HIDRÓGENO} * V_{1kg \text{ AIRE}} = 37,769 * 830495,806 \text{ cm}^3 = 31367223,965 \text{ cm}^3$$

Sabiendo que la velocidad de giro del cigüeñal es constante y toma un valor de 3000 rpm, y teniendo en cuenta que en este caso de estudio se va a inyectar solamente durante el ciclo de admisión y que este representa una cuarta parte del ciclo total, se calcula el tiempo de inyección:

$$t_{inyección} = \frac{t_{ciclo}}{N_{tiempos}} = \frac{0,04}{4} = 0,01 \text{ sec} \quad (13)$$

A continuación, conocido el tiempo de inyección, se calcula el volumen de hidrógeno que se podrá inyectar, así como el porcentaje que este ocupará en el cilindro, teniendo en cuenta la limitación de caudal que presenta el generador de hidrógeno (95 l/h) y el porcentaje de hidrógeno que este genera (65,116%):

$$\begin{aligned} V_{in-cyl. \text{ HIDRÓGENO}} &= q_{generador} * t_{inyección} * \%_{HIDRÓGENO \text{ generado}} \\ &= 95 \frac{l}{h} * \frac{1 h}{3600 sec} * \frac{1000 cm^3}{1 l} * 0,01 sec * \frac{65,116}{100} = 0,17183 \text{ cm}^3 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\%_{in-cyl. \text{ HIDRÓGENO}} = \frac{V_{in-cyl. \text{ HIDRÓGENO}}}{V_{cilindro}} = \frac{0,17183}{208} * 100 = 0,0826 \% \quad (15)$$

Conocido el volumen de hidrógeno que se inyectará en el motor, se puede conocer el volumen de oxígeno que se inyectará, producto de la generación de hidrógeno, y que será el que permitirá combustionar el hidrógeno. Dicho cálculo se realiza del mismo modo que en el párrafo anterior, siguiendo las ecuaciones (14) y (15):

$$\begin{aligned} V_{in-cyl. \text{ OXÍGENO}} &= q_{generador} * t_{inyección} - V_{in-cyl. \text{ HIDRÓGENO}} \\ &= 95 \frac{l}{h} * \frac{1 h}{3600 sec} * \frac{1000 cm^3}{1 l} * 0,01 sec - 0,17183 \text{ cm}^3 = 0,09206 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

$$\%_{in-cyl. \text{ OXÍGENO}} = \frac{V_{in-cyl. \text{ OXÍGENO}}}{V_{cilindro}} = \frac{0,09206}{208} * 100 = 0,0443 \%$$

Seguidamente, se procede a calcular el volumen y porcentaje de gasolina y aire presentes en el cilindro. Para ello, se emplean las ecuaciones (16) y (9):

$$\begin{aligned} \%_{in-cyl. \text{ AIRE}} &= \frac{V_{1kg \text{ AIRE}}}{V_{1kg \text{ GASOLINA}} + V_{15,115kg \text{ AIRE}}} \\ & * \left( 100 - (\%_{in-cyl. \text{ HIDRÓGENO}} + \%_{in-cyl. \text{ OXÍGENO}}) \right) \\ &= \frac{12553016,958}{1369,863 + 12553016,958} * (100 - 0,0826 - 0,0443) = 99,8622 \% \end{aligned} \quad (16)$$

$$V_{in-cyl. \text{ AIRE}} = \%_{in-cyl. \text{ AIRE}} * V_{cilindro} = \frac{99,8622}{100} * 208 = 207,7134 \text{ cm}^3$$

$$\begin{aligned} \%_{in-cyl. GASOLINA} &= \frac{V_{1kg GASOLINA}}{V_{1kg GASOLINA} + V_{15,115kg AIRE}} * (100 - (\%_{in-cyl. HIDRÓGENO} + \%_{in-cyl. OXÍGENO})) \\ &= \frac{1369,863}{1369,863 + 12553016,958} * (100 - 0,0826 - 0,0443) = 0,0109 \% \end{aligned}$$

$$V_{in-cyl. GASOLINA} = \%_{in-cyl. GASOLINA} * V_{cilindro} = \frac{0,0109}{100} * 208 = 0,02267 \text{ cm}^3$$

Con los valores de volumen de ambos combustibles, se procede a la realización del cálculo energético para la mezcla, de la misma forma que se procedió en el cálculo análogo del caso anterior, ecuación (10), pero en este caso sumando el valor de la energía encontrado para cada combustible:

$$\begin{aligned} E_{GASOLINA} &= PCI * \rho_{GASOLINA} * V_{in-cyl. GASOLINA} = 43950 \frac{kJ}{kg} * 730 \frac{kg}{m^3} * 0,02267 \text{ cm}^3 * \frac{1 \text{ m}^3}{10^6 \text{ cm}^3} \\ &= 0,7272 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{HIDRÓGENO} &= PCI * \rho_{HIDRÓGENO} * V_{in-cyl. HIDRÓGENO} \\ &= 120011 \frac{kJ}{kg} * 0,0899 \frac{kg}{m^3} * 0,17183 \text{ cm}^3 * \frac{1 \text{ m}^3}{10^6 \text{ cm}^3} = 0,0019 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$$E_{TOTAL} = E_{GASOLINA} + E_{HIDRÓGENO} = 0,7272 + 0,0019 = \mathbf{0,7291 \text{ kJ}}$$

Con el valor de energía, sabiendo que el motor del grupo electrógeno es un motor de 4 tiempos, es decir que tarda dos vueltas en realizar un ciclo entero y que trabaja a una velocidad de 3000 rpm, se puede obtener el valor de potencia desarrollada por el motor, según la ecuación (12), teniendo en cuenta la hipótesis 3 descrita en el primer punto de este apartado (4.1.1):

$$\begin{aligned} t_{ciclo} &= \frac{2 \text{ rev}}{1 \text{ ciclo}} * \frac{1 \text{ minuto}}{3000 \text{ rev}} * \frac{60 \text{ sec}}{1 \text{ minuto}} = 0,04 \frac{\text{sec}}{\text{ciclo}} \\ P_{TOTAL} &= \frac{E_{TOTAL}}{t_{ciclo}} * \eta_{motor} = \frac{0,7291}{0,04} * \frac{30}{100} = 5,4682 \frac{kJ}{\text{sec}} \end{aligned}$$

Usando el factor de conversión de kJ/s a CV de 1,3596, se obtiene:

$$P_{TOTAL} = 5,4682 \frac{kJ}{s} * 1,3596 = \mathbf{7,4345 \text{ CV}}$$

Si se compara el resultado obtenido en este caso de estudio con el resultado presentado en el caso anterior (4.1.2), se puede observar que la hibridación de combustibles no solo puede presentar una ventaja respecto a las emisiones, sino que también presenta un aumento de potencia, aunque sea insignificante, prácticamente nulo. Ello contradice la suposición inicial sobre la pérdida de potencia que conllevaría la inyección de hidrógeno en un motor de combustión interna alimentado por hidrógeno.

La hoja de cálculos de este procedimiento se puede encontrar en el ANEXO 7.



#### 4.1.4 CÁLCULO ENERGÉTICO PARA LA HIBRIDACIÓN DE COMBUSTIBLES (PARTE 2)

En este tercer caso y al igual que en el caso anterior (4.1.3), se ha estudiado la afectación del hidrógeno sobre el caso de estudio del trabajo, es decir, se ha tenido en cuenta el proceso de generación de hidrógeno del que se dispone, así como el limitante del proceso, el caudal máximo de generación de hidrógeno del dispositivo del que se dispone.

Por otro lado, se ha realizado este cálculo considerando que la inyección de hidrógeno se realizará de forma no controlada, o lo que es lo mismo, se va a inyectar hidrógeno de forma continuada con la finalidad de aumentar el volumen de hidrógeno inyectado en el motor.

Los cálculos aplicados en este caso se han realizado de forma análoga a los del caso de estudio anterior (4.1.3), con la peculiaridad de que el tiempo de admisión para este caso es distinto. En este caso, al estar inyectando hidrógeno de forma continuada durante todo el ciclo, el tiempo de inyección es el mismo que el tiempo de un ciclo:

$$t_{inyección} = t_{ciclo} = 0,04 \text{ s}$$

Siguiendo con los cálculos del mismo modo que se ha procedido en el caso anterior (4.1.3), se obtiene el valor de potencia desarrollada por el motor en estas condiciones:

$$P_{TOTAL} = 7,4630 \text{ CV}$$

Al igual que en el caso de estudio anterior (4.1.3), se puede observar un aumento en la potencia desarrollada por el motor del grupo electrógeno. En este caso, se llega a la misma conclusión que en el caso anterior, este aumento de la potencia se debe a la inyección de oxígeno puro, que favorece la combustión del hidrógeno y permite introducir más combustible en el cilindro, aumentando así la potencia que el motor desarrolla.

La hoja de cálculos de este procedimiento se puede encontrar en el ANEXO 8.

## 4.2 CÁLCULO EMISIONES

En esta parte de los cálculos se ha realizado un estudio teórico acerca de la influencia del hidrógeno sobre las emisiones generadas por la combustión para cada uno de los tres casos estudiados en el apartado anterior, es decir, para el funcionamiento con cada uno de los combustibles trabajando de forma independiente y para los dos casos de hibridaje de estos.

La finalidad de este apartado es tener una idea aproximada de los resultados que se deberían esperar al usar el sensor desarrollado en la primera parte del trabajo.

### 4.2.1 HIPÓTESIS INICIALES

Con la finalidad de obtener unos resultados fiables y lo más cercanos posibles a la realidad y teniendo en cuenta la complejidad de los modelos reales de los motores de combustión interna, se han realizado ciertas simplificaciones y aproximaciones de cara a realizar este estudio teórico. Algunos aspectos del cálculo pueden provocar que exista un cierto error que, no obstante, es despreciable o asumible.

A continuación, se exponen las hipótesis, suposiciones y aclaraciones realizadas para el desarrollo de este apartado del cálculo:

1. La combustión de ambos combustibles es completa e ideal.

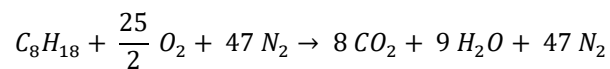
2. Para la combustión incompleta y no ideal se han tomado los valores de concentración de productos de reacción definidos en un motor de combustión interna sin catalizador, alimentado por un sistema de carburación (L. R. Sassykova, 2018).
3. La combustión del hidrogeno, si se produce de forma incompleta o no ideal, puede llegar a generar óxidos de nitrógeno. Como el de estudio de este trabajo se basa en las emisiones de monóxido de carbono, las emisiones que este combustible ( $H_2$ ) pueda generar más allá del monóxido de carbono quedan fuera del estudio y por tanto se obviarán.
4. Algunos valores calculados dependen de las condiciones atmosféricas del lugar en el que se lleven a cabo las pruebas.

#### 4.2.2 CÁLCULO DE LAS EMISIONES POR LA COMBUSTIÓN DE AMBOS COMBUSTIBLES

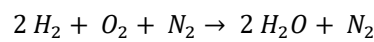
En este apartado se han calculado las emisiones producidas por la combustión de ambos combustibles de forma independiente, es decir, suponiendo el funcionamiento del motor del grupo electrógeno con ambos combustibles por separado.

La reacción que se ha tomado para este caso de estudio es la misma que se ha usado en el anterior apartado de cálculos (4.1):

Por lo que a la combustión de la gasolina se refiere:



Para la combustión del hidrógeno:



Es decir, se ha realizado un estudio sobre las emisiones que se generarían en ambos casos debido a una combustión perfecta e ideal. Revisando ambas reacciones se puede observar que el hecho de que el hidrógeno no contenga moléculas de carbono en su composición tiene una gran influencia sobre la emisión de gases contaminantes, ya que el producto de la combustión de este solo genera agua.

A continuación, se detalla el procedimiento de cálculo para observar la diferencia de emisiones de ambos combustibles.

Tomando los valores de volumen para ambos casos, se procede a realizar el cálculo de las emisiones que se generan por cada ciclo de funcionamiento del motor. En este caso, igual que en el caso análogo del primer apartado de cálculos (4.1.2), se va a detallar el procedimiento que se ha seguido para el cálculo de la gasolina como ejemplo:

Teniendo en cuenta los siguientes valores obtenidos en apartados anteriores:

$$AFR_{GASOLINA} = 15,115 \frac{kg \text{ Aire}}{kg \text{ Gasolina}}$$

$$V_{in-cyl. GASOLINA} = 0,0227 \text{ cm}^3$$

Se debe proceder al cálculo de la relación entre las emisiones que se generan y la masa de combustible que se quema, a la que se ha querido llamar EFR (Emissions Fuel Ratio). Para ello se va a realizar el cálculo siguiendo la ecuación (17) para cada uno de los productos de la reacción, que para el caso de la gasolina ( $C_8H_{18}$ ) son agua ( $H_2O$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ):

$$\begin{aligned}
 EFR_{CO_2} &= \frac{m_{CO_2}}{m_{GASOLINA}} = \frac{n_{CO_2} * mw_{CO_2}}{n_{GASOLINA} * mw_{GASOLINA}} = \frac{8 * 12,011}{1 * (8 * 12,011 + 18 * 1,008)} \\
 &= 3,081 \frac{kg CO_2}{kg Gasolina}
 \end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
 EFR_{H_2O} &= \frac{m_{H_2O}}{m_{GASOLINA}} = \frac{n_{H_2O} * mw_{H_2O}}{n_{GASOLINA} * mw_{GASOLINA}} = \frac{9 * (2 * 1,008 + 15,990)}{1 * (8 * 12,011 + 18 * 1,008)} \\
 &= 1,419 \frac{kg CO_2}{kg Gasolina}
 \end{aligned}$$

Conocida la relación entre los productos y el combustible y conocido el volumen de combustible presente en el cilindro, así como su densidad, se pueden calcular los gramos por ciclo de cada producto que se emitirán durante la combustión, dada la ecuación (18):

$$\begin{aligned}
 EM_{CO_2 GASOLINA} &= EFR_{CO_2} * V_{in-cyl. GASOLINA} * \rho_{GASOLINA} \\
 &= 3,081 \frac{kg CO_2}{kg Gasolina} * 0,0227 cm^3 * 730 \frac{kg}{m^3} * \frac{1 m^3}{10^6 cm^3} * \frac{1000 gramos}{1 kg} \\
 &= 0,051043 \frac{gramos}{ciclo}
 \end{aligned} \tag{18}$$

$$\begin{aligned}
 EM_{H_2O GASOLINA} &= EFR_{H_2O} * V_{in-cyl. GASOLINA} * \rho_{GASOLINA} \\
 &= 1,419 \frac{kg CO_2}{kg Gasolina} * 0,0227 cm^3 * 730 \frac{kg}{m^3} * \frac{1 m^3}{10^6 cm^3} * \frac{1000 gramos}{1 kg} \\
 &= 0,023504 \frac{gramos}{ciclo}
 \end{aligned}$$

Una forma más fácil de ver los resultados sería obtenerlos en unidades de gramos/segundo, para poder ver así las emisiones en función de una unidad de tiempo más fácil de comparar. Al conocer el valor de la velocidad nominal del cigüeñal, este cálculo se puede realizar de acuerdo con la ecuación (19):

$$\begin{aligned}
 Emisiones_{CO_2 GASOLINA} &= \frac{EM_{CO_2 GASOLINA}}{t_{ciclo}} = \frac{0,051043 \frac{gramos}{ciclo}}{\frac{2 rev}{ciclo} * \frac{1 min}{3000 rev} * \frac{60sec}{1 min}} \\
 &= 1,276068 \frac{gramos}{sec}
 \end{aligned} \tag{19}$$

$$Emisiones_{H_2O GASOLINA} = \frac{EM_{H_2O GASOLINA}}{t_{ciclo}} = \frac{0,023504 \frac{gramos}{ciclo}}{\frac{2 rev}{ciclo} * \frac{1 min}{3000 rev} * \frac{60sec}{1 min}} = 0,587597 \frac{gramos}{sec}$$

Por lo que se refiere a las emisiones que se generan debido a la combustión del hidrógeno, y siguiendo la misma metodología que se ha seguido con la gasolina, se obtiene el siguiente valor:

$$Emisiones_{H_2O HIDRÓGENO} = 0,589135 \frac{gramos}{sec}$$

Como se puede observar, las emisiones contaminantes teóricas producto de la combustión del hidrógeno son inexistentes. El 100% de los productos de reacción son de vapor de agua. Este hecho es la principal ventaja de usar el hidrógeno como combustible, tal y como se ha ido comentando a lo largo de este documento.

La hoja de cálculos de este procedimiento se puede encontrar en el ANEXO 9.

#### 4.2.3 CÁLCULO DE LAS EMISIONES POR LA COMBUSTIÓN HÍBRIDA IDEAL (PARTE 1)

En este apartado se ha realizado el cálculo de las emisiones producidas por la combustión del segundo caso de estudio, es decir, el caso dónde se hibridan los combustibles y se inyecta esta mezcla de combustible solamente durante el ciclo de admisión.

Cabe destacar que este cálculo sigue basándose en la reacción estequiométrica de la combustión de ambos combustibles y se considera una combustión ideal y completa, de acuerdo con la hipótesis 1.

Igual que para el caso anterior (4.2.2), los valores obtenidos en el cálculo análogo del primer apartado (4.1.3) se deben tener en cuenta para la realización de este. Así pues, se recuperan de dicho cálculo los valores de la relación AFR tanto de la gasolina como del hidrógeno, así como los valores de volumen en el cilindro para cada uno de los combustibles:

$$AFR_{GASOLINA} = 15,115 \frac{kg \text{ Aire}}{kg \text{ Gasolina}}$$

$$V_{in-cyl. GASOLINA} = 0,02267 \text{ cm}^3$$

$$AFR_{HIDRÓGENO} = 37,769 \frac{kg \text{ Aire}}{kg \text{ Hidrógeno}}$$

$$V_{in-cyl. HIDRÓGENO} = 0,17183 \text{ cm}^3$$

Procediendo del mismo modo que en el caso de estudio anterior (4.2.2), se van a calcular las emisiones generadas en gramos/segundo. Para ello se toman los valores de EFR calculados anteriormente:

$$EFR_{CO_2 GASOLINA} = 3,081 \frac{kg CO_2}{kg \text{ Gasolina}}$$

$$EFR_{H_2O GASOLINA} = 1,419 \frac{kg CO_2}{kg \text{ Gasolina}}$$

Y se procede al cálculo del EFR del agua para el caso del hidrógeno, siguiendo la ecuación (17):

$$\begin{aligned} EFR_{H_2O HIDRÓGENO} &= \frac{m_{H_2O}}{m_{HIDRÓGENO}} = \frac{n_{H_2O} * mw_{H_2O}}{n_{HIDRÓGENO} * mw_{HIDRÓGENO}} = \frac{2 * (2 * 1,008 + 15,990)}{2 * (2 * 1,008)} \\ &= 4,466 \frac{kg H_2O}{kg HIDRÓGENO} \end{aligned}$$

Conocidos los EFR para todos los productos de la combustión, se procede al cálculo de los valores de emisiones del mismo modo que en el caso de estudio anterior (4.2.2), siguiendo la ecuación (19) y obteniendo los siguientes resultados:

$$Emisiones_{CO_2} = EM_{CO_2 GASOLINA} = 1,274449 \frac{gramos}{sec}$$

$$Emisiones_{H_2O} = EM_{H_2O GASOLINA} + EM_{H_2O HIDRÓGENO} = 0,588577 \frac{gramos}{sec}$$

Como se puede observar comparando el valor de las emisiones de CO<sub>2</sub> obtenido en este caso, con el obtenido en el caso anterior, gracias a una pequeña inyección de hidrógeno se reduce en 2 miligramos/segundo la cantidad de dióxido de carbono emitida. Puede parecer una reducción insignificante, pero si se tiene en cuenta que un grupo electrógeno puede estar trabajando horas sin parar,

esta reducción se traduce en 7,2 gramos/hora. Se trata de una reducción significativa en comparación con la cantidad de hidrógeno que se le está inyectando al motor.

La hoja de cálculos de este procedimiento se puede encontrar en el ANEXO 10.

#### 4.2.4 CÁLCULO DE LAS EMISIONES POR LA COMBUSTIÓN HÍBRIDA IDEAL (PARTE 2)

Al igual que en el tercer caso de estudio del primer apartado de los cálculos (0), en este se ha realizado el cálculo de las emisiones teóricas para el hibridaje de combustibles suponiendo que la inyección se realiza durante todo el ciclo de funcionamiento del motor.

Cabe destacar, al igual que en los dos casos anteriores, que este cálculo sigue basándose en la reacción estequiométrica de la combustión de ambos combustibles y se considera una combustión ideal y completa de acuerdo con la hipótesis 1.

Para la realización del cálculo de este caso, se ha seguido el mismo procedimiento que para el caso anterior (4.2.3), con la peculiaridad de que, para este caso de estudio, el tiempo de inyección se ha tomado del caso de estudio análogo del apartado anterior (0):

$$t_{inyección} = t_{ciclo} = \mathbf{0,04 \text{ sec}}$$

Así pues, siguiendo el mismo procedimiento de cálculo que se ha empleado en el caso de estudio anterior (4.2.3), se ha procedido a aproximar el valor de las emisiones en gramos/sec que se generarían por la combustión del hibridaje de combustibles:

$$Emisiones_{CO_2} = EM_{CO_2 \text{ GASOLINA}} = \mathbf{1,269592 \frac{gramos}{sec}}$$

$$Emisiones_{H_2O} = EM_{H_2O \text{ GASOLINA}} + EM_{H_2O \text{ HIDRÓGENO}} = \mathbf{0,591514 \frac{gramos}{sec}}$$

Como se puede observar, el valor de las emisiones de agua es superior a las generadas en el caso de estudio anterior (4.2.3). Este hecho es debido al aumento de cantidad de hidrógeno que se inyecta en el combustible. Así, la reducción en las emisiones de dióxido de carbono es proporcional a la cantidad de gasolina sustituida o, lo que es lo mismo, a la cantidad de hidrógeno inyectado.

La hoja de cálculos de este procedimiento se puede encontrar en el ANEXO 11.

#### 4.2.5 CÁLCULO DE LAS EMISIONES POR LA COMBUSTIÓN “REAL” DE LA GASOLINA

En este caso de estudio se ha realizado el cálculo de las emisiones “reales” que se producirán por la combustión de la gasolina en el motor original del que se dispone, es decir, las emisiones que se generaran por la combustión única de la gasolina. Este cálculo se lleva a cabo con la finalidad de tener el valor de referencia y poder comparar con los cálculos posteriores cual es la afectación de la inyección de hidrógeno en las emisiones que produce la combustión.

Para este punto del cálculo se han tomado los valores de concentración de productos de la reacción de combustión de la gasolina definidos en el artículo referido en la hipótesis 3 de este apartado (4.2.1). Estos valores son los mostrados en la tabla siguiente (Tabla 12):

**Tabla 12.** Concentración de cada uno de los contaminantes que emite un motor de combustión interna sin catalizador. Fuente: L. R. Sassykova, 2018.

| CONCENTRACIÓN EMISIONES REALES |        |          |
|--------------------------------|--------|----------|
| CO2 Concentration              | 2,0190 | kg/lComb |
| H2O Concentration              | 0,9900 | kg/lComb |
| O2 Concentration               | 0,1300 | kg/lComb |
| N2 Concentration               | 8,5680 | kg/lComb |
| H2 Concentration               | 0,0420 | kg/lComb |
| CO Concentration               | 0,1670 | kg/lComb |
| HC Concentration               | 0,0150 | kg/lComb |
| NOx Concentration              | 0,0130 | kg/lComb |
| SO2 Concentration              | 0,0002 | kg/lComb |

Conocidos estos valores, así como el volumen de gasolina que combustiona en este caso de estudio, obtenido en el cálculo análogo del primer apartado (4.1.2), se puede calcular la cantidad de contaminantes en gramos/sec que se emitirán producto de la combustión de la gasolina.

$$V_{in-cyl. GASOLINA} = 0,02270 \text{ cm}^3$$

Tomando como referencia el cálculo de las emisiones que se producirán de monóxido de carbono, siguiendo las ecuaciones (20) y (21), las emisiones del resto de los contaminantes se han calculado de forma análoga a la que a continuación se describe:

$$EM_{CO} = \frac{\text{Concentración}_{CO}}{\rho_{GASOLINA}} = \frac{0,167 \frac{kg}{litro} * \frac{1 \text{ litro}}{1000 \text{ cm}^3}}{730 \frac{kg}{m^3} * \frac{1 \text{ m}^3}{10^6 \text{ cm}^3}} = 0,2288 \frac{kg_{CO}}{kg_{GASOLINA}} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} Emisiones_{CO} &= \frac{V_{in-cyl. GASOLINA} * \rho_{GASOLINA} * EM_{CO}}{t_{ciclo}} \\ &= \frac{0,02270 \text{ cm}^3 * 730 \frac{kg}{m^3} * \frac{1 \text{ m}^3}{10^6 \text{ cm}^3} * \frac{10^3 \text{ gramos}}{1 \text{ kg}} * 0,2288}{\frac{2 \text{ rev}}{ciclo} * \frac{1 \text{ min}}{3000 \text{ rev}} * \frac{60 \text{ sec}}{1 \text{ min}}} \\ &= 0,094755 \frac{\text{gramos}_{CO}}{\text{sec}} = 94,755 \frac{\text{mgramos}_{CO}}{\text{sec}} \end{aligned} \quad (21)$$

Realizando el cálculo para el resto de los productos de la reacción, se obtienen los valores mostrados en la siguiente tabla (Tabla 13):

**Tabla 13.** Resultados de las emisiones producidas por la combustión de la gasolina. Fuente: propia.

| MASA EMISIONES               |                 |                  |
|------------------------------|-----------------|------------------|
| In-cyl. C8H18 Volume         | 0,02270         | cm <sup>3</sup>  |
| CO2 Emissions                | 1,145569        | grams/sec        |
| H2O Emissions                | 0,561720        | grams/sec        |
| O2 Emissions                 | 0,073761        | grams/sec        |
| N2 Emissions                 | 4,861434        | grams/sec        |
| H2 Emissions                 | 0,023831        | grams/sec        |
| CO Emissions                 | <b>0,094755</b> | <b>grams/sec</b> |
| HC Emissions                 | 0,008511        | grams/sec        |
| NOx <sup>(4)</sup> Emissions | 0,007376        | grams/sec        |
| SO2 Emissions                | 0,000136        | grams/sec        |

La hoja de cálculos de este procedimiento se puede encontrar en el ANEXO 12.

<sup>4</sup> Se define el NO<sub>2</sub> como el óxido de nitrógeno principal, ya que es el óxido de nitrógeno que más emisiones representa con respecto al resto.

#### 4.2.6 CÁLCULO DE LAS EMISIONES POR LA COMBUSTIÓN HÍBRIDA “REALES” (PARTE 1)

Para este caso de estudio se ha tomado como referencia el valor de concentración de cada uno de los productos según la referencia definida en la hipótesis 2 de este apartado (4.2.1). Se ha decidido estudiar un caso más “real” para observar la afectación que realmente tendría la inyección de hidrógeno en un motor de combustión interna como el propuesto en este trabajo.

Con la finalidad de estudiar la afectación “real” de la inyección de hidrógeno en el motor del grupo electrógeno, se han calculado las emisiones que genera la combustión incompleta y no ideal de la gasolina, ya que la combustión del hidrógeno por más incompleta y no ideal que sea no generará más que agua y algunos óxidos de nitrógeno, que de acuerdo con la hipótesis 3 de este apartado se obviarán del cálculo.

Para realizar el cálculo de las emisiones en este caso de estudio y al igual que para los dos apartados anteriores (4.1 y 0), se ha definido el tiempo de inyección del mismo modo que en los casos equivalentes de dichos apartados (4.1.3 y 4.2.3), es decir, la inyección del hidrógeno se produce durante el ciclo de admisión del motor de combustión.

$$t_{inyección} = \frac{t_{ciclo}}{N_{tiempos}} = \frac{0,04}{4} = \mathbf{0,01 \text{ sec}}$$

Para este punto del cálculo se han tomado los valores de concentración de productos de la reacción de combustión de la gasolina definidos en el artículo referido en la hipótesis 3 de este apartado (4.2.1), es decir, los valores mostrados en la Tabla 12.

Conocidos dichos valores, así como el volumen de gasolina que combustiona en este caso de estudio, obtenido en el cálculo análogo del primer apartado (4.1.3), se puede calcular la cantidad de contaminantes en gramos/sec que se emitirán producto de la combustión de la gasolina.

$$V_{in-cyl. \text{ GASOLINA}} = 0,02267 \text{ cm}^3$$

Tomando como referencia el cálculo de las emisiones que se producirán de monóxido de carbono, siguiendo las ecuaciones (20) y (21), las emisiones del resto de los contaminantes se han calculado de forma análoga a la que a continuación se describe:

$$EM_{CO} = \frac{Concentración_{CO}}{\rho_{GASOLINA}} = \frac{0,167 \frac{kg}{litro} * \frac{1 \text{ litro}}{1000 \text{ cm}^3}}{730 \frac{kg}{m^3} * \frac{1 \text{ m}^3}{10^6 \text{ cm}^3}} = \mathbf{0,2288 \frac{kg_{CO}}{kg_{GASOLINA}}} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} Emisiones_{CO} &= \frac{V_{in-cyl. \text{ GASOLINA}} * \rho_{GASOLINA} * EM_{CO}}{t_{ciclo}} \\ &= \frac{0,02270 \text{ cm}^3 * 730 \frac{kg}{m^3} * \frac{1 \text{ m}^3}{10^6 \text{ cm}^3} * \frac{10^3 \text{ gramos}}{1 \text{ kg}} * 0,2288}{\frac{2 \text{ rev}}{\text{ciclo}} * \frac{1 \text{ min}}{3000 \text{ rev}} * \frac{60 \text{ sec}}{1 \text{ min}}} \\ &= \mathbf{0,094755 \frac{gramos_{CO}}{sec} = 94,755 \frac{mgramos_{CO}}{sec}} \end{aligned} \quad (23)$$

Realizando el cálculo del mismo modo que para el caso de estudio anterior (0), se obtienen los valores de contaminantes que se emiten, mostrados en la siguiente tabla (Tabla 14):

Tabla 14. Resultados de las emisiones producidas por la combustión de la gasolina. Fuente: propia.

| MASA EMISIONES               |                 |                  |
|------------------------------|-----------------|------------------|
| In-cyl. C8H18 Volume         | 0,02267         | cm <sup>3</sup>  |
| CO2 Emissions                | 1,144116        | grams/sec        |
| H2O Emissions                | 0,561008        | grams/sec        |
| O2 Emissions                 | 0,073668        | grams/sec        |
| N2 Emissions                 | 4,855267        | grams/sec        |
| H2 Emissions                 | 0,023800        | grams/sec        |
| CO Emissions                 | <b>0,094635</b> | <b>grams/sec</b> |
| HC Emissions                 | 0,008500        | grams/sec        |
| NOx <sup>(4)</sup> Emissions | 0,007367        | grams/sec        |
| SO2 Emissions                | 0,000136        | grams/sec        |

Si se observan los resultados obtenidos en este apartado, y se comparan con los obtenidos en el caso de estudio anterior (4.2.5), se puede observar cómo las emisiones “reales” generadas por un motor de combustión interna, con parte del combustible sustituido por hidrógeno, no distan mucho de las emisiones calculadas en la parte teórica, hecho que indica que el mayor porcentaje de emisiones generadas por un motor son las relativas al dióxido de carbono.

Por otro lado, la reducción de monóxido de carbono que se observa en este caso de estudio, donde la inyección de hidrógeno es mínima, es prácticamente imperceptible.

La hoja de cálculos de este procedimiento se puede encontrar en el ANEXO 13.

#### 4.2.7 CÁLCULO DE LAS EMISIONES POR LA COMBUSTIÓN HÍBRIDA “REALES” (PARTE 2)

Al igual que en los casos de estudio anteriores (4.2.5 y 4.2.6), se han tomado los valores de concentración de emisiones definidos en el documento referenciado en la hipótesis 3 de este apartado (4.2.1). Para este caso de estudio, del mismo modo que en apartados anteriores, se han calculado las emisiones relativas al funcionamiento del motor con combustible híbrido, inyectando hidrógeno durante todo el ciclo de funcionamiento de este. Con este motivo se toman los valores de volumen de gasolina en el cilindro y tiempo de inyección, determinados en el caso de estudio análogo del apartado anterior (4.1.4), siendo estos valores:

$$t_{inyección} = t_{ciclo} = 0,04 \text{ sec}$$

$$V_{in-cyl. GASOLINA} = 0,02258 \text{ cm}^3$$

Con estos valores y los definidos en la hipótesis 3 se procede al cálculo de gramos/sec que se emiten de cada uno de los productos de reacción, del mismo modo que se ha procedido en los dos casos de estudio anteriores (4.2.5 y 4.2.6), obteniendo los siguientes resultados (Tabla 15):

Tabla 15. Resultados de las emisiones producidas por la combustión de la gasolina. Fuente: propia.

| MASA EMISIONES               |                 |                  |
|------------------------------|-----------------|------------------|
| In-cyl. C8H18 Volume         | 0,022581        | cm <sup>3</sup>  |
| CO2 Emissions                | 1,1398          | grams/sec        |
| H2O Emissions                | 0,558870        | grams/sec        |
| O2 Emissions                 | 0,073387        | grams/sec        |
| N2 Emissions                 | 4,836764        | grams/sec        |
| H2 Emissions                 | 0,023710        | grams/sec        |
| CO Emissions                 | <b>0,094274</b> | <b>grams/sec</b> |
| HC Emissions                 | 0,008468        | grams/sec        |
| NOx <sup>(4)</sup> Emissions | 0,007339        | grams/sec        |
| SO2 Emissions                | 0,000135        | grams/sec        |



A diferencia del caso de estudio anterior (4.2.6), la reducción en los valores de CO emitidos por el motor, empiezan a ser perceptibles en este caso. Si bien con la cantidad de hidrógeno inyectado no se consiguen grandes resultados, se espera que este tenga una gran influencia a mayores concentraciones.

La hoja de cálculos de este procedimiento se puede encontrar en el ANEXO 14.

### 4.3 MODELO DE COMBUSTIÓN

Con la finalidad de desarrollar el diagrama P-V para cada uno de los casos de estudio de este trabajo, se ha definido un modelo de combustión que permita modelar el funcionamiento del motor tanto en condiciones normales, funcionando con gasolina, como en condiciones de hibridación de combustibles.

#### 4.3.1 HIPÓTESIS INICIALES

Con el objetivo de obtener unos resultados fiables y lo más cercanos posibles a la realidad y teniendo en cuenta la complejidad de los modelos reales de los motores de combustión interna, se han realizado ciertas simplificaciones y aproximaciones de cara a realizar este estudio teórico. El hecho de asumir ciertos aspectos del cálculo puede hacer que exista un cierto error, que bien es despreciable o asumible. Algunos aspectos del cálculo pueden provocar que exista un cierto error que, no obstante, es despreciable o asumible.

A continuación, se exponen las hipótesis, suposiciones y aclaraciones realizadas para el desarrollo de este apartado del cálculo:

1. El ciclo de quemado corresponde a la duración de la combustión del 0-99,9% de la fracción de masa quemada.
2. El modelo de combustión de la gasolina está definido por el modelo estándar de Wiebe.
3. El modelo de combustión híbrido está definido por el modelo doble de Wiebe.
4. La presencia de hidrógeno en el cilindro acelerará la combustión de la gasolina debido a su alta velocidad de propagación del frente de llama. Esta aceleración se verá reflejada en el avance de encendido.
5. Se supone una combustión con flujo laminar en su totalidad.
6. Algunos valores calculados dependen de las condiciones atmosféricas del lugar en el que se lleven a cabo las pruebas.
7. La combustión del hidrógeno sucede de forma tan rápida que, independientemente de la variación en la velocidad de rotación del motor, los ángulos que definen la combustión de dicho elemento no se verán afectados.
8. La geometría del motor tiene una influencia directa sobre el modelo de combustión y por ello, para cada motor, el modelo de combustión es ligeramente distinto. Para la elaboración del modelo de combustión que se ha caracterizado, se ha buscado bibliografía dónde la experimentación se llevara a cabo en motores de cilindrada unitaria parecida a la del motor empleado en este proyecto.

#### 4.3.2 MODELO DE COMBUSTIÓN GASOLINA

Para la realización de este apartado se han definido los parámetros necesarios para determinar la curva estándar de Wiebe, que se ha tomado como modelo para definir la combustión de la gasolina.

Se ha decidido tomar el modelo de combustión estándar de Wiebe ya que éste es un modelo fidedigno, muy usado en desarrollo de motores (Yeliana, Cooney, Worm, Michalek, & Naber, 2011), en particular en modelos de combustión SI (Spark Ignition). Es una forma sencilla de aproximar la fracción de masa quemada durante el proceso de combustión, en relación con el ángulo de cigüeñal, si se compara con

otros modelos más complejos. La función que define el modelo estándar de Wiebe es la mostrada en la ecuación (24) (Jinlong Liu, 2019):

$$x_b = \left\{ 1 - e^{\left[ -a \left( \frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta} \right)^{m+1} \right]} \right\} \quad (24)$$

Donde,

$x_b$ : Fracción de masa quemada

$a$ : Parámetro de eficiencia

$\theta$ : Ángulo de cigüeñal

$\theta_0$ : Ángulo de cigüeñal en que se inicia la combustión

$\Delta\theta = \theta_{90} - \theta_0$ : Duración de la combustión

$m$ : Factor de forma de la combustión

El valor tomado como parámetro de eficiencia es el determinado para las condiciones definidas en la hipótesis 1 de este apartado (4.3.1), para una duración de combustión de entre el 0-99,9% de la  $x_b$ . El valor del parámetro de eficiencia es el siguiente (Yeliana, Cooney, Worm, Michalek, & Naber, 2011):

$$a = 6,9078$$

Por lo que al factor de forma se refiere, puede definirse de muchos modos, tomando como referencia para la elaboración de este estudio el método de cálculo definido por la ecuación (25) (Yeliana C. C., 2008):

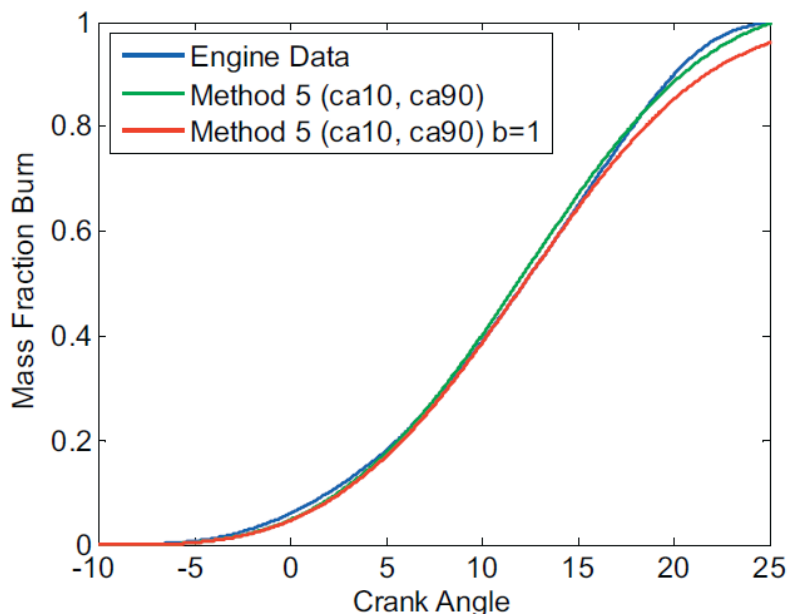
$$m = \frac{\ln \frac{\ln 0,1}{\ln 0,9}}{\ln \frac{\theta_{90} - \theta_0}{\theta_{10} - \theta_0}} - 1 \quad (25)$$

Donde,

$\theta_{10}$ : Ángulo de cigüeñal en que se ha quemado el 10% de la fracción de masa

$\theta_{90}$ : Ángulo de cigüeñal en que se ha quemado el 90% de la fracción de masa

La determinación del factor de forma mediante la ecuación (25) se basa en dos puntos de referencia conocidos de la combustión que se pretende definir. Como se puede observar en la Figura 11, la determinación del modelo de combustión a partir del cálculo del parámetro "m" descrito en la ecuación (25), línea roja, presenta una buena correlación con el modelo obtenido de forma experimental, línea azul.



**Figura 11.** Comparación de la función estándar de Wiebe obtenida de forma experimental vs. el método definido por la ecuación (25). Fuente: (Yousufuddin, 2017).

Para poder definir el modelo es necesario conocer los ángulos en los que se inicia la combustión, así como dos valores referencia necesarios para determinar el valor del factor de forma. De acuerdo con el procedimiento descrito en el párrafo anterior, para el caso se han tomado los ángulos en los que se ha quemado un 10% y un 90% de la fracción de masa quemada respectivamente. El hecho de escoger estos puntos no es aleatorio; son muchos los estudios que recogen el comportamiento de la gasolina en estos términos.

Definiendo en 2500 rpm el valor de referencia de la velocidad angular para una velocidad media, se procede al cálculo de los ángulos según la velocidad del motor en el que se basa el desarrollo de este proyecto, según la relación definida por las ecuaciones (26) y (27):

$$\theta_{10} = 40,5 + \Delta rpm^{0,2} \tag{26}$$

$$\theta_{90} = 93,5 + \Delta rpm^{0,2} \tag{27}$$

Esta relación no es una relación impuesta, sino que tiene sus fundamentos en el siguiente hecho: la duración de la combustión del combustible es constante, independientemente de la velocidad que lleve el motor en el instante de la combustión, mientras que el tiempo que transcurre, o lo que es lo mismo, los grados que gira el cigüeñal, aumentan con la velocidad de giro de este (Cheng, 2008).

Por lo que a estos valores se refiere (40,5 y 93,5 grados), vienen dados en distintos documentos basados en la experimentación y el análisis de distintos motores, y en donde se concluye que para el valor de referencia de velocidad, anteriormente mencionado, el ángulo donde se quema el 10% y el 90% de la masa de combustible es de 40,5 grados y 93,5 grados respectivamente (Cheng, 2008).

El valor del ángulo  $\theta_0$  hace referencia al inicio de la combustión y por lo tanto al avance de encendido; este valor puede oscilar dependiendo de la geometría del motor y del combustible usado, pero al tratarse en este caso de un motor de geometría común y un combustible comercial, se ha determinado que el avance de encendido sea de 10 grados (Jinlong Liu, 2019) y que la duración de la combustión es de 93,5 grados (Yousufuddin, 2017).

Conociendo el valor de la velocidad de giro del cigüeñal del motor en que se basa este trabajo (3000 rpm), así como las relaciones anteriormente descritas, ecuaciones (26) y (27), se pueden determinar los ángulos referencia para el caso de la gasolina:

$$\theta_0 = -10^\circ$$

$$\theta_{10} = 33,97^\circ$$

$$\theta_{90} = 86,97^\circ$$

$$\Delta\theta = \theta_{90} - \theta_0 = 86,97 - (-10) = 96,97^\circ$$

Conocidos los valores de los tres ángulos, se calcula el valor del factor de forma para el modelo de combustión de la gasolina, de acuerdo con la ecuación (25):

$$m = \frac{\ln \frac{0,1}{0,9}}{\ln \frac{86,97 - (-10)}{33,97 - (-10)}} - 1 = 2,899628$$

Con todos los valores característicos de la combustión definidos, se sustituyen en la ecuación (24) y se elabora un gráfico que muestre el comportamiento del combustible a medida que se va quemando, dicho gráfico es el mostrado en la Figura 12:

$$x_b = \left\{ 1 - e^{\left[ -6,9078 \left( \frac{\theta - (-10)}{96,97} \right)^{2,899628+1} \right]} \right\}$$

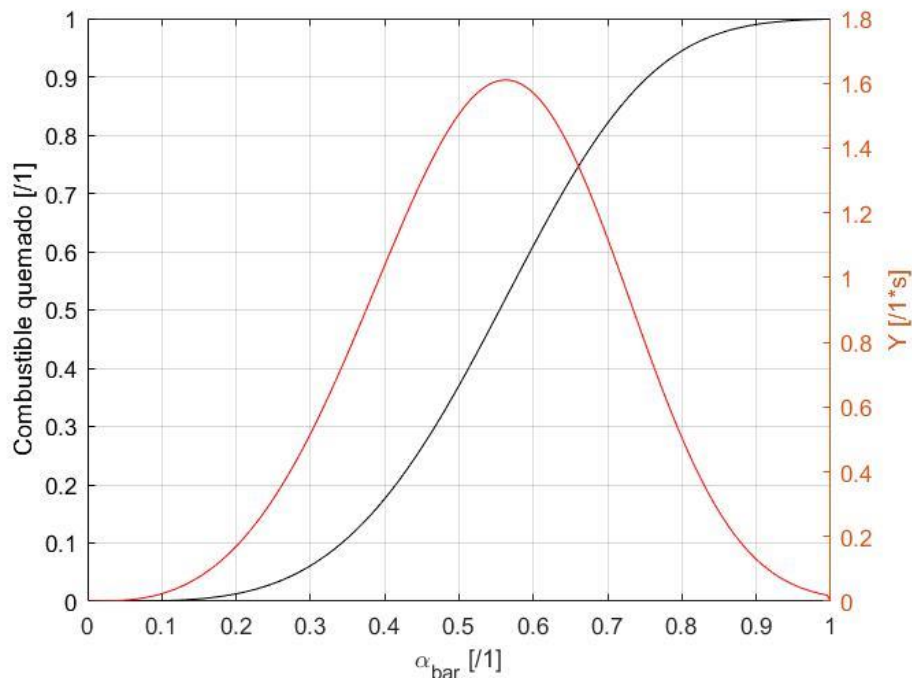


Figura 12. Modelo de combustión de la gasolina y su derivada. Fuente: propia.

La hoja de cálculos de este procedimiento se puede encontrar en el ANEXO 15.

### 4.3.3 MODELO DE COMBUSTIÓN HÍBRIDO V.1

Al igual que en el anterior, en este apartado se ha definido un modelo de combustión para explicar el comportamiento de la combustión de la mezcla de combustibles. Ello requeriría experimentar con la finalidad de desarrollar una correlación matemática para definir el comportamiento de dicha combustión en el motor estudiado. Debido a circunstancias de fuerza mayor, la parte práctica de este proyecto no se ha podido desarrollar y se ha recurrido a modelos matemáticos, así como a resultados de otros experimentos llevados a cabo por centros de investigación y universidades. (F Bonatesta, 2009) (Yousufuddin, 2017) (Durgun, 2003) (Sun Bai-gang, 2013) (Changwei Ji, 2009) (Yaodong Du, 2015)

Como en el modelo de combustión que se ha tomado para la gasolina, este también está basado en el modelo de combustión de Wiebe, pero en este caso no se trata de la función simple de combustión definida por dicho autor, sino de la función doble. Esta función permite caracterizar una combustión en dos partes en las que una parte del combustible quema de forma más rápida que otra.

Para la elaboración de este caso de estudio se ha definido el modelo de tal forma que la parte del combustible que combustiona de forma rápida sea la totalidad del hidrógeno, mientras que la que quema de forma lenta sea la de la gasolina. Esta justificación tiene su razón de ser en el siguiente gráfico relativo a las velocidades de propagación de la llama (Sun Bai-gang, 2013).

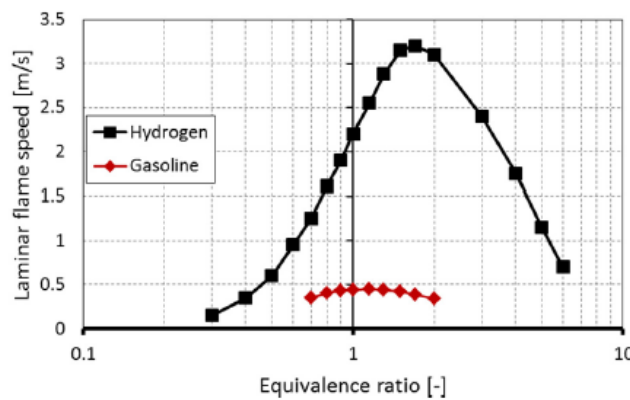


Figura 13. Velocidad de propagación de la llama. Fuente: (Sun Bai-gang, 2013).

En este proyecto, y como ya se ha comentado a lo largo del documento, todos los cálculos se han realizado bajo la suposición de que la combustión se produce de forma estequiométrica o, lo que es lo mismo, que la totalidad de los reactivos interaccionan y por lo tanto existe la cantidad justa de cada uno de ellos para que suceda la combustión; este hecho se traduce en un ratio de equivalencia de 1.

Comparando los valores de velocidades de frente de llama que se muestran en la Figura 13, se puede observar que la velocidad de propagación de la llama de hidrógeno es 4 veces superior a la de la gasolina y, por lo tanto, el hecho de suponer que la combustión se llevará a cabo en dos partes queda justificada.

Así pues, la ecuación (28), define el modelo de combustión para el caso de estudio híbrido (Jinlong Liu, 2019):

$$x_b = \lambda \left\{ 1 - e^{\left[ -a_1 \left( \frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta_1} \right)^{m_1+1} \right]} \right\} + (1 - \lambda) \left\{ 1 - e^{\left[ -a_2 \left( \frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta_2} \right)^{m_2+1} \right]} \right\} \quad (28)$$

Donde,

$\lambda$ : Fracción de hidrógeno respecto al total de combustibles.

Para este caso de estudio, y de forma análoga al caso de estudio anterior (4.3.2), se deben definir los parámetros que determinan la forma que tomará el gráfico que caracterizará la evolución de la combustión definida por la doble función de Wiebe. Para ello se sigue el mismo procedimiento de cálculo o estimación que en dicho caso de estudio, con la peculiaridad que para este caso se deben definir no solo los ángulos y factores de forma y eficiencia para la combustión de la gasolina, sino que además se deben definir los relativos a la combustión del hidrógeno. Además, para este caso, se debe definir también el parámetro  $\lambda$ , relativo a la cantidad de hidrógeno presente en la combustión (Jinlong Liu, 2019).

Dicho parámetro  $\lambda$  se obtiene del cálculo porcentual de volumen de hidrógeno presente en el cilindro en el momento de combustión respecto al volumen de combustible total, de acuerdo con la ecuación (29):

$$\lambda = \frac{V_{in-cyl. \text{ HIDRÓGENO}}}{V_{in-cyl. \text{ GASOLINA}} + V_{in-cyl. \text{ HIDRÓGENO}}} = \frac{0,17183}{0,17183 + 0,02267} = 0,8835 \quad (29)$$

En la ecuación (28) se definen parámetros distintos de ángulos para cada una de las dos partes de la fórmula, ya no solo para tener en cuenta la forma y eficiencia de cada una de las combustiones, sino porque además, la duración de la combustión de cada combustible va a ser distinta y por lo tanto la posición del cigüeñal al finalizar cada una de las combustiones será diferente.

Para definir los ángulos a los que en los párrafos anteriores se hace referencia, se ha optado por definirlos, al igual que en el caso de estudio anterior, a partir de bibliografía debido a las restricciones experimentales con las que nos hemos encontrado los autores de este documento.

Así pues, se han estudiado diferentes artículos científicos (F Bonatesta, 2009) (Yousufuddin, 2017) (Durgun, 2003) (Sun Bai-gang, 2013) (Changwei Ji, 2009) (Yaodong Du, 2015), llegando a determinar los valores de los ángulos que darán forma al modelo del siguiente modo: los valores de los ángulos que definirán el comportamiento de la gasolina se ven afectados por la presencia de hidrógeno de forma muy liviana, de acuerdo con la hipótesis 4 de este apartado (4.3.1), la única afectación que tendrá la inyección de hidrógeno sobre el comportamiento de la gasolina es un retraso en el avance de combustión que, para el caso de estudio, se traduce en un avance de encendido nulo, es decir que la ignición se produce en el PMS (Changwei Ji, 2009). Por lo que a los ángulos de cigüeñal relativos a la combustión del hidrógeno se refiere, se obtienen mediante la aplicación de las ecuaciones (30) y (31), basadas en las ecuaciones (26) y (27) pero adaptadas a los ángulos característicos del hidrógeno.

$$\theta_{10} = 25,5 + \Delta rpm^{0,2} \quad (30)$$

$$\theta_{90} = 40 + \Delta rpm^{0,2} \quad (31)$$

Así pues, los ángulos que caracterizan dicho modelo de combustión son los siguientes:

$$\theta_0 = 0^\circ$$

$$\theta_{10 \text{ GASOLINA}} = 33,97^\circ$$

$$\theta_{90 \text{ GASOLINA}} = 86,97^\circ$$

$$\Delta\theta_{\text{GASOLINA}} = \theta_{90} - \theta_0 = 86,97 - (0) = 86,97^\circ$$

$$\theta_{10 \text{ HIDRÓGENO}} = 28,97^\circ$$

$$\theta_{90 \text{ HIDRÓGENO}} = 43,47^\circ$$

$$\Delta\theta_{\text{HIDRÓGENO}} = \theta_{90} - \theta_0 = 43,47 - (0) = 43,47^\circ$$

Relativo a los factores de forma y eficiencia que caracterizan la ecuación (28) se definen los parámetros de la misma forma que se ha hecho en el caso de estudio anterior (4.3.2). El parámetro que define la

eficiencia de la combustión para ambos casos se va a tomar como el valor que define que la duración de la combustión constituye el 0-99,9% de la  $x_b$  (Yeliana, Cooney, Worm, Michalek, & Naber, 2011):

$$a_1 = a_2 = 6,9078$$

Por lo que al factor de forma se refiere, se calcula para ambos casos de acuerdo con la ecuación (25), obteniendo los siguientes valores:

$$m_1 = 6,599674$$

$$m_2 = 2,280710$$

Así pues, la ecuación que modela el comportamiento de la combustión de la mezcla de combustibles tiene la forma que se muestra en la Figura 14 y queda definida del siguiente modo:

$$x_b = 0,8835 \left\{ 1 - e \left[ -6,9078 \left( \frac{\theta - (-5)}{43,47} \right)^{6,599674+1} \right] \right\} + 0,1165 \left\{ 1 - e \left[ -6,9078 \left( \frac{\theta - (-5)}{86,97} \right)^{2,280710+1} \right] \right\}$$

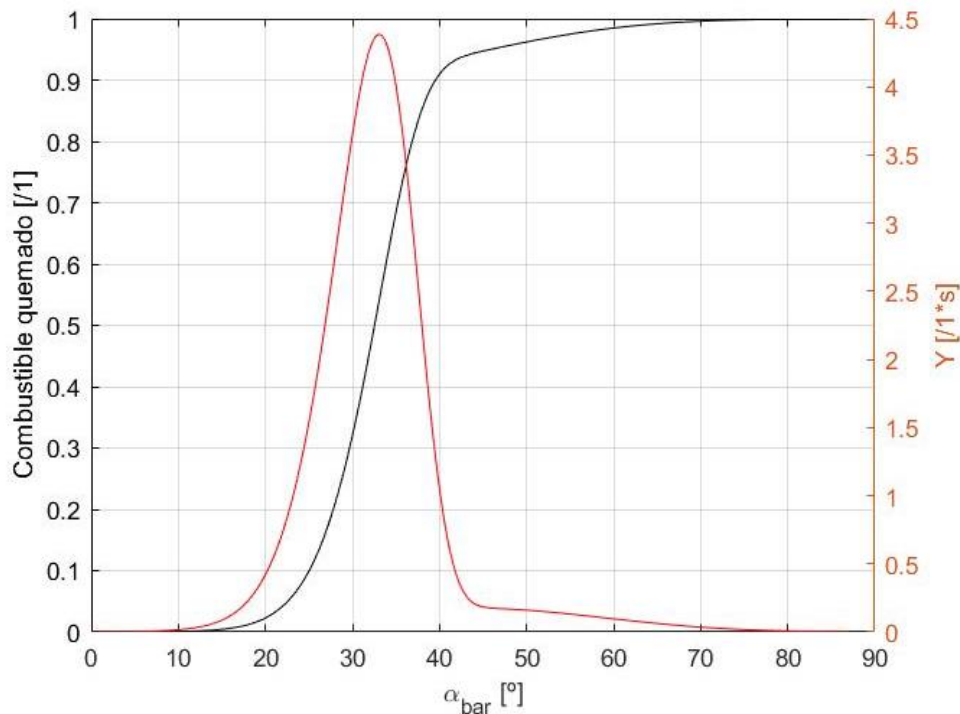


Figura 14. Modelo de combustión para el caso de estudio de la hibridación de combustibles y su derivada. Fuente: propia.

Se define sólo un modelo de combustión debido a que los cambios entre ambos modelos híbridos solamente afectan al valor de lambda. Esta cambia de  $\lambda=0,8835$  a  $\lambda=0,9682$ .

En la figura anterior (Figura 14), se muestra además la derivada de la ecuación que define el modelo de combustión desarrollado para la gasolina y que indica la velocidad de la combustión.

La hoja de cálculos de este procedimiento se puede encontrar en el ANEXO 16.

#### 4.3.4 MODELO DE COMBUSTIÓN HÍBRIDO V.2

Con la finalidad de desarrollar un modelo útil para caracterizar el comportamiento de la combustión de la mezcla de combustibles propuesta, hidrógeno y gasolina, a diferentes niveles de concentración, y poder así simular con las herramientas que más adelante se describen, se ha desarrollado una segunda versión del modelo de combustión. Este modelo de combustión desarrollado a base de investigación teórica sirve

al igual que el modelo anterior, para alimentar posteriormente las herramientas de simulación Matlab y LES (Lotus Engine Simulation) y poder realizar una aproximación teórica más realista del funcionamiento del motor alimentado por la mezcla de combustibles que se propone en este documento.

Cabe destacar que, para la utilización de esta segunda versión del modelo de combustión desarrollada, se requiere de una fase de validación experimental que permita garantizar que los valores que se obtienen de los parámetros característicos son objetivos y fiables. Así pues, el modelo utilizado para los siguientes pasos de simulación es la primera versión, más sencilla, pero basada en experimentación de otros autores.

Esta versión del modelo de combustión se ha desarrollado para estudiar la afectación de la inyección de hidrógeno en un motor ICE, para valores de concentración de hasta el 10%. Esta restricción se ha aplicado después de estudiar las obras de otros autores (Yaodong Du, 2015) y observar que el efecto del hidrógeno sobre la gasolina a partir de valores de concentración superiores al 10% se mantiene constante. Así pues, el modelo se ha desarrollado siguiendo el procedimiento que a continuación se describe.

Partiendo de la base de la experimentación de otros autores sobre el hibridaje de combustibles (Yaodong Du, 2015), se ha desarrollado una función para determinar la duración de la combustión de la gasolina, así como los ángulos característicos. Estos datos se han extraído de la Figura 15. El modelo se ha desarrollado bajo la suposición de que la combustión del hidrógeno sucede de forma tan rápida que, independientemente de las variaciones en las rpm o concentraciones de hidrógeno, el valor de los ángulos que definen el modelo de combustión no se verá afectados, tal y como se define en la hipótesis 7 de este apartado (4.3.1). Dichas ecuaciones son las que a continuación se muestran como ecuación (32) (33) y (34).

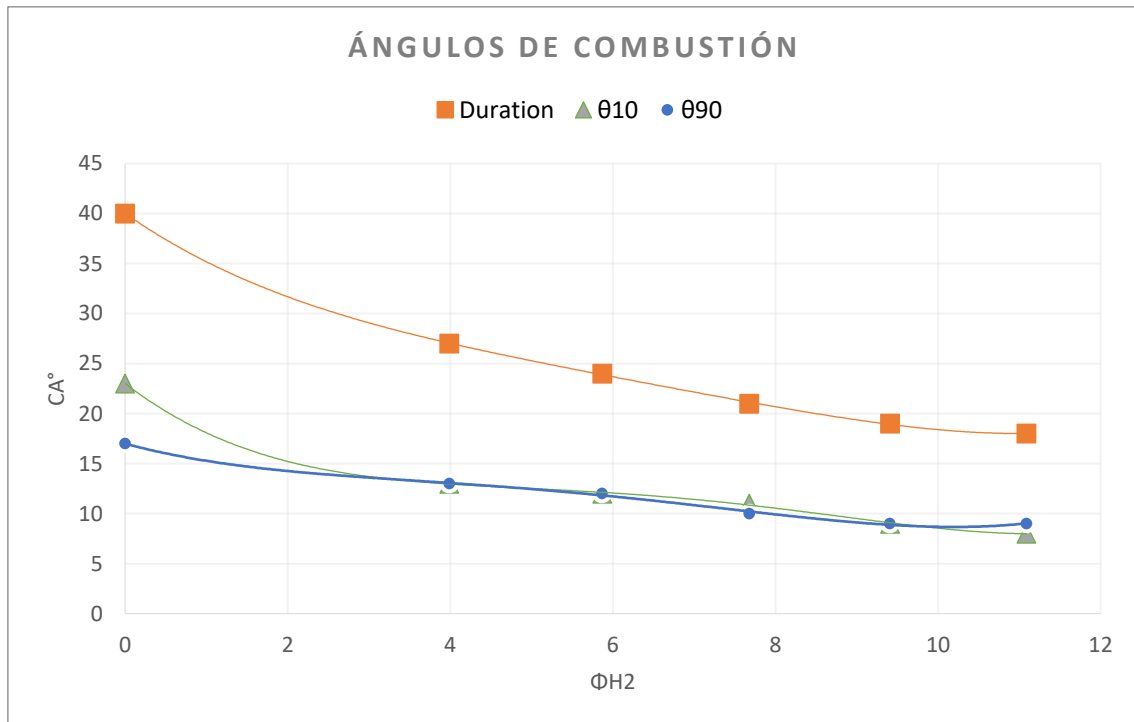


Figura 15. Ángulos característicos de la combustión del hibridaje de combustibles. Fuente: (Yaodong Du, 2015).

$$Duration = -0,0076 * \varphi_{H_2}^3 + 0,2825 * \varphi_{H_2}^2 - 4,1855 * \varphi_{H_2}^1 + 39,967 \quad (32)$$

$$\theta_{10} = 0,0056 * \varphi_{H_2}^4 - 0,1533 * \varphi_{H_2}^3 + 1,4535 * \varphi_{H_2}^2 - 6,2308 * \varphi_{H_2}^1 + 23,002 \quad (33)$$

$$\theta_{90} = \theta_{10} + 0,0035 * \varphi_{H_2}^4 - 0,0768 * \varphi_{H_2}^3 + 0,5548 * \varphi_{H_2}^2 - 2,1997 * \varphi_{H_2}^1 + 16,997 \quad (34)$$



*Dónde,*

$$\varphi_{HIDRÓGENO} = \frac{V_{HIDRÓGENO}}{V_{HIDRÓGENO} + V_{AIRE}} \quad (35)$$

Con estas ecuaciones que caracterizan el modelo de combustión y modificando los parámetros de velocidad de rotación del motor, así como el caudal de inyección de hidrógeno y el ángulo de avance de encendido se pueden modelar distintas condiciones de ensayo (modelos de combustión) para distintos casos de funcionamiento del motor.

La hoja de cálculos de este procedimiento se puede encontrar en el ANEXO 17, dónde se muestran los resultados para un ejemplo de cálculo aleatorio.

## CAPÍTULO 5: TERMODINÁMICA DEL CILINDRO

### 5.1 DIAGRAMA P-V

En este apartado de los cálculos se han realizado 3 aproximaciones del diagrama P-V del motor escogido para los diferentes casos de estudio que se han llevado a cabo.

Para este caso de estudio se ha decidido usar Matlab ya que el departamento de máquinas y motores térmicos de la ETSEIB y más concretamente el tutor de este trabajo, el profesor Vicente de Medina Iglesias, dispone de un código que se ajusta a la perfección a las demandas de este apartado. Este código llamado “*Engines Simulation Toolbox*” (de Medina Iglesias, 2016) permite, tras unos pequeños ajustes para adaptarlo al motor del grupo electrógeno con el que se está trabajando, conseguir un diagrama P-V muy fidedigno y que se ajuste al máximo al diagrama real del motor.

#### 5.1.1 HIPÓTESIS INICIALES

Con la finalidad de obtener unos resultados fiables y lo más cercanos posibles a la realidad y teniendo en cuenta la complejidad de los modelos reales de los motores de combustión interna, se han realizado ciertas simplificaciones y aproximaciones de cara a realizar este estudio teórico. Algunos aspectos del cálculo pueden provocar que exista un cierto error que, no obstante, es despreciable o asumible.

A continuación, se exponen las hipótesis, suposiciones y aclaraciones realizadas para el desarrollo de este apartado del cálculo:

1. Para realizar los cálculos se usará el modelo de combustión definido en el apartado 4.3.
2. Las características del combustible híbrido se supondrán como una media ponderada de las de ambos combustibles.
3. El diagrama P-V ideal se supondrá como un modelo isotérmico y adiabático.
4. El cilindro se supone totalmente estanco, por tanto, no existen pérdidas de combustible.
5. El pistón se desplaza dentro del cilindro sin ningún tipo de rozamiento.
6. Algunos valores calculados dependen de las condiciones atmosféricas del lugar en el que se lleven a cabo las pruebas.
7. Las pérdidas de calor del motor se calculan a partir de Nusselt, ya que este es el modelo que mejor caracteriza las pérdidas por convección en los cilindros.
8. Se supone una combustión donde el flujo es laminar en su totalidad.

#### 5.1.2 CÁLCULO DEL DIAGRAMA P-V MEDIANTE MATLAB PARA COMBUSTIÓN DE GASOLINA

Al disponer ya de un código funcional, se han tenido que cambiar solamente los valores que no se ajustaban a las dimensiones reales del motor, así como los del modelo de combustión a utilizar en este subapartado (4.3.2).

Los primeros datos que se han cambiado han sido los de dimensiones y funcionamiento del motor, de los cuales, algunos sirven también para los próximos apartados. Se ha extraído información de la ficha de datos del grupo electrógeno, se han adaptado a las necesidades de este trabajo y se ha asumido, por conocimiento general, que el porcentaje de volumen que ocupa la cámara de combustión es de un 10% del cilindro y que trabaja con una relación de compresión de 9 a 1 aproximadamente, por tanto, las medidas son las siguientes:

- Volumen de la cámara de combustión:  $20,8 \text{ cm}^3$
- Volumen total del cilindro:  $208 \text{ cm}^3$

- Velocidad de rotación del motor:  $3000 \text{ min}^{-1}$
- Relación aire-combustible:  $15,115 \text{ kg}_{\text{aire}}/\text{kg}_{\text{combustible}}$
- PCI de la gasolina:  $43950 \text{ kJ/kg}$

Una vez realizados estos cambios, se puede exportar la Figura 16 de Matlab.

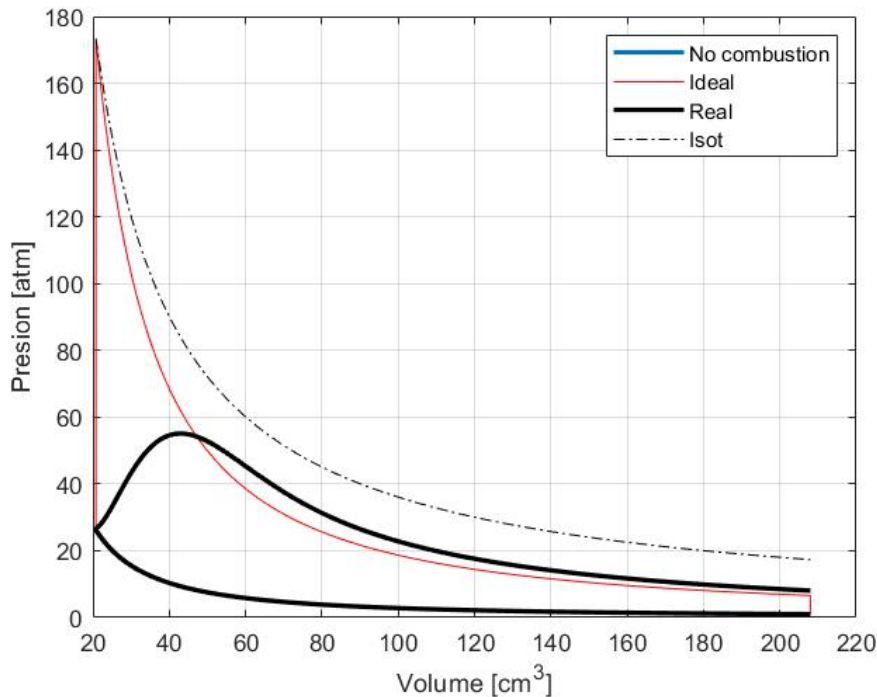


Figura 16. Diagrama P-V de la gasolina. Fuente: propia.

### 5.1.3 CÁLCULO DEL DIAGRAMA P-V MEDIANTE MATLAB PARA COMBUSTIÓN HÍBRIDA (PARTE 1)

En este apartado se procede a calcular un diagrama P-V para el caso de combustión híbrida en el que solamente se inyecta hidrógeno al motor durante la fase de admisión.

Para poder utilizar el mismo código que en el apartado 5.1.2 se han tenido que realizar una serie de cambios respecto al modelo original. Las dimensiones del motor se han mantenido, así como la velocidad de rotación, pero, al tratarse en este apartado de una mezcla de combustibles formada por hidrógeno y gasolina en diferentes cantidades, se han tenido que adaptar tanto la relación aire-combustible como el PCI.

Para calcular el poder calorífico inferior (PCI) del hibridaje de los dos combustibles se ha asumido que éste es la media ponderada de Julios por kilogramo de combustible que se encuentra en el cilindro. Es decir:

$$\begin{aligned}
 PCI_{\text{combustible}} &= \frac{PCI_{H_2} \cdot m_{H_2} + PCI_{C_8H_{18}} \cdot m_{C_8H_{18}}}{m_{H_2} + m_{C_8H_{18}}} \\
 &= \frac{120011 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 1,54 \cdot 10^{-8} + 43950 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 1,66 \cdot 10^{-5} \text{ kg}}{1,54 \cdot 10^{-8} \text{ kg} + 1,66 \cdot 10^{-5} \text{ kg}} = 44020,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (36)
 \end{aligned}$$

Además, la relación aire-combustible que se encuentra en el cilindro es diferente y esto influye en la cantidad de fuel inyectada. Para simplificar los cálculos, en este caso, en lugar de calcular dicha relación

se ha decidido usar directamente la masa de fuel que se encuentra en el cilindro, calculada a partir de la ecuación (37):

$$m_{H_2} + m_{C_8H_{18}} = 1,54 \cdot 10^{-8} kg + 1,66 \cdot 10^{-5} kg = \mathbf{1,661 \cdot 10^{-5} kg \text{ de combustible}} \quad (37)$$

También se ha cambiado la ecuación del modelo de combustión por la que hace referencia a la combustión híbrida de gasolina e hidrógeno cuando éste se inyecta solamente en el ciclo de admisión (0).

Así pues, con estos cambios realizados se puede extraer de Matlab la Figura 17/Figura 16. Diagrama P-V de la gasolina.

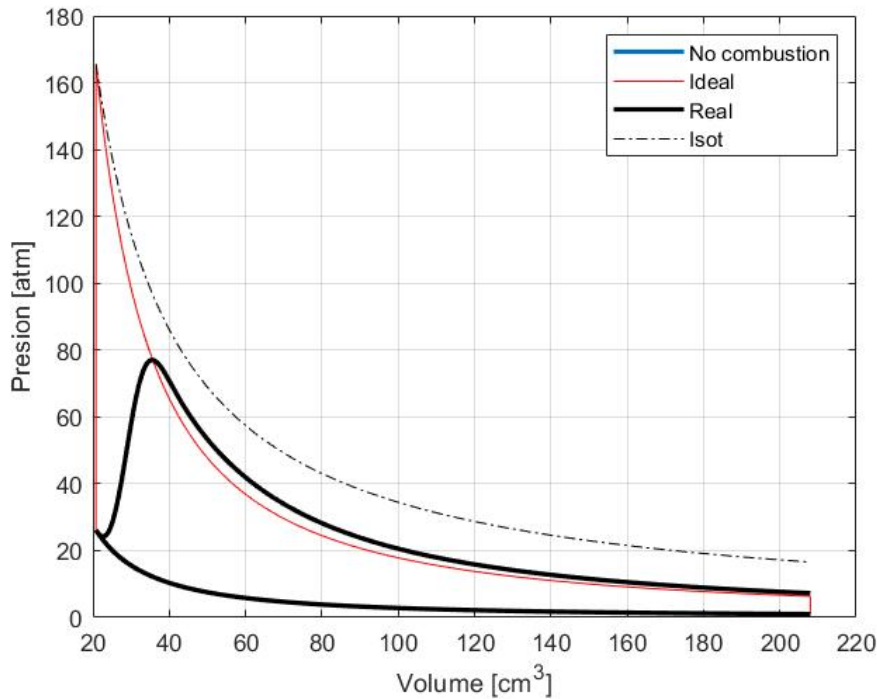


Figura 17. Diagrama P-V del modelo híbrido 1. Fuente: propia.

#### 5.1.4 CÁLCULO DEL DIAGRAMA P-V MEDIANTE MATLAB PARA COMBUSTIÓN HÍBRIDA (PARTE 2)

Para realizar este apartado se han seguido exactamente los mismos pasos que en el apartado 5.1.3. Al tratarse del mismo caso, pero inyectando hidrógeno en los cuatro ciclos del motor, lo único que varía es la cantidad de combustible de cada tipo que se inyecta. Este hecho nos obliga a recalcular el PCI de la nueva combinación de fuel y su masa total según las ecuaciones (36) y (37):

$$\begin{aligned}
 PCI_{combustible} &= \frac{PCI_{H_2} \cdot m_{H_2} + PCI_{C_8H_{18}} \cdot m_{C_8H_{18}}}{m_{H_2} + m_{C_8H_{18}}} \\
 &= \frac{120011 \frac{kJ}{kg} \cdot 6,18 \cdot 10^{-8} + 43950 \frac{kJ}{kg} \cdot 1,65 \cdot 10^{-5} kg}{6,18 \cdot 10^{-8} kg + 1,65 \cdot 10^{-5} kg} = \mathbf{44233,83 \frac{kJ}{kg}}
 \end{aligned}$$

$$m_{H_2} + m_{C_8H_{18}} = 6,18 \cdot 10^{-8} kg + 1,65 \cdot 10^{-5} kg = \mathbf{1,656 \cdot 10^{-5} kg \text{ de combustible}}$$

Una vez realizados estos cambios necesarios, se puede proceder a la extracción y exportar el diagrama P-V de Matlab (Figura 18).

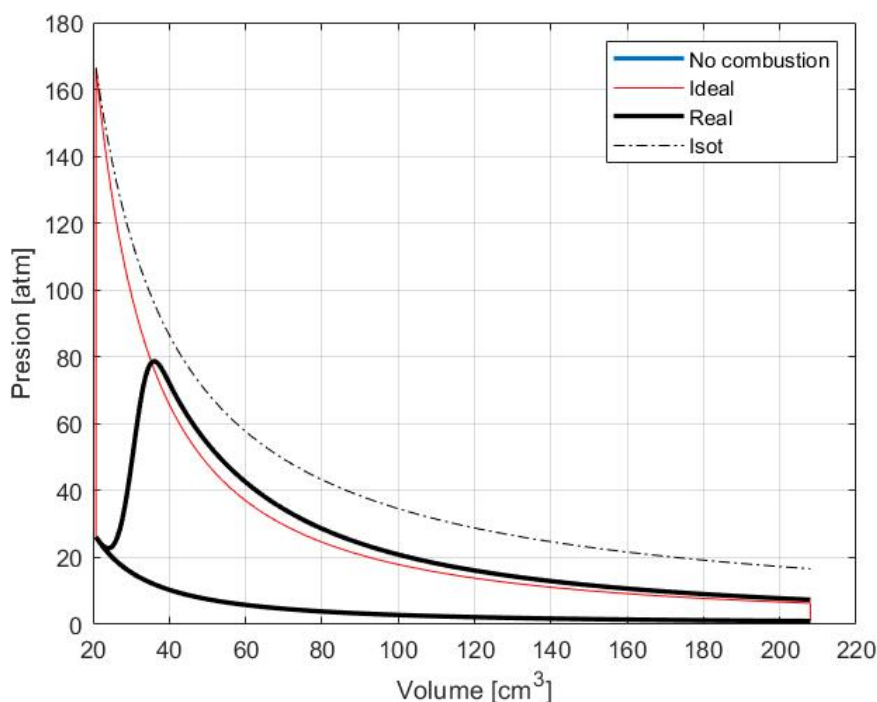


Figura 18. Diagrama P-V del modelo híbrido 2. Fuente: propia.

## 5.2 DIAGRAMA P-V OPTIMIZADO

Como se puede comprobar en los diagramas P-V mostrados anteriormente, estos no se asemejan en nada al modelo que seguiría un diagrama P-V ideal, al cual se aspira como meta final a la vez que utópica. De todas maneras, para mejorar el rendimiento de las disposiciones de motor con las cuales se está trabajando, se ha decidido realizar unas iteraciones optimizadoras. Estas iteraciones están limitadas a valores enteros de grados de avance de la combustión en cada modelo de combustión para que no sean infinitas.

### 5.2.1 HIPÓTESIS INICIALES

Con la finalidad de obtener unos resultados fiables y lo más cercanos posibles a la realidad, y teniendo en cuenta la complejidad de los modelos reales de los motores de combustión interna, se han realizado ciertas simplificaciones y aproximaciones de cara a realizar este estudio teórico. Algunos aspectos del cálculo pueden provocar que exista un cierto error que, no obstante, es despreciable o asumible.

A continuación, se exponen las hipótesis, suposiciones y aclaraciones realizadas para el desarrollo de este apartado del cálculo:

1. Para realizar los cálculos se usará el modelo de combustión definido en el apartado 4.3.
2. Las características del combustible híbrido se supondrán como una media ponderada de las de ambos combustibles.
3. El diagrama P-V ideal se supondrá como un modelo isotérmico y adiabático.
4. El cilindro se supone totalmente estanco, por tanto, no existen pérdidas de combustible.
5. El pistón se desplaza dentro del cilindro sin ningún tipo de rozamiento.
6. Algunos valores calculados dependen de las condiciones atmosféricas del lugar en el que se lleven a cabo las pruebas.
7. Las pérdidas de calor del motor se calculan a partir de Nusselt ya que este es el modelo que mejor caracteriza las pérdidas por convección en los cilindros.
8. Se supone una combustión donde el flujo es laminar en su totalidad.

### 5.2.2 CÁLCULO DIAGRAMA P-V OPTIMIZADO

Para optimizar estos diagramas se debe maximizar el trabajo realizado por el motor, es decir, el área interior de la curva "Real". Para conseguir esto mediante Matlab, se calcula el trabajo de cada iteración según el modelo de combustión, que se consigue mediante la ecuación (38):

$$W = -P \cdot \Delta V \quad (38)$$

Así pues, para el caso del modelo de combustión de la gasolina, el trabajo optimizado es de 442,171 J y su diagrama P-V se puede ver en la Figura 19, para un avance de combustión óptimo de 35º.

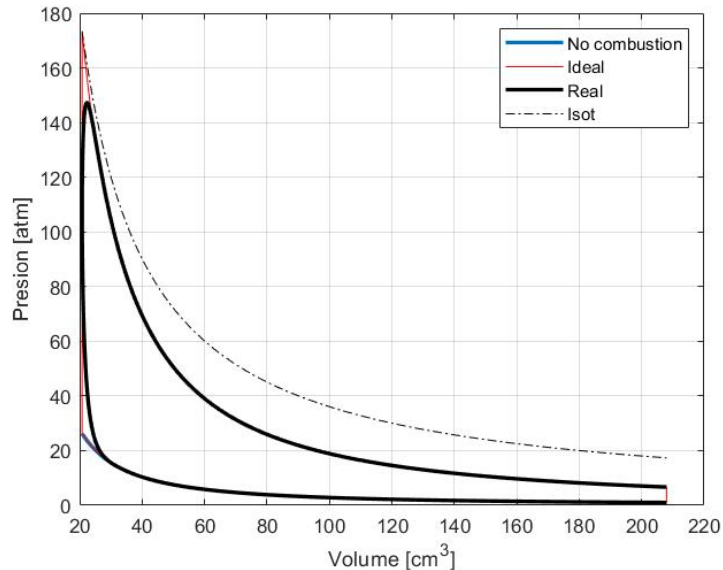


Figura 19. Diagrama P-V optimizado del modelo de gasolina. Fuente: propia.

De la misma manera, para el primer caso de modelo de combustión híbrida, el trabajo máximo ha sido de 421,619 J y se ha conseguido con un avance de la combustión de 18º (Figura 20).

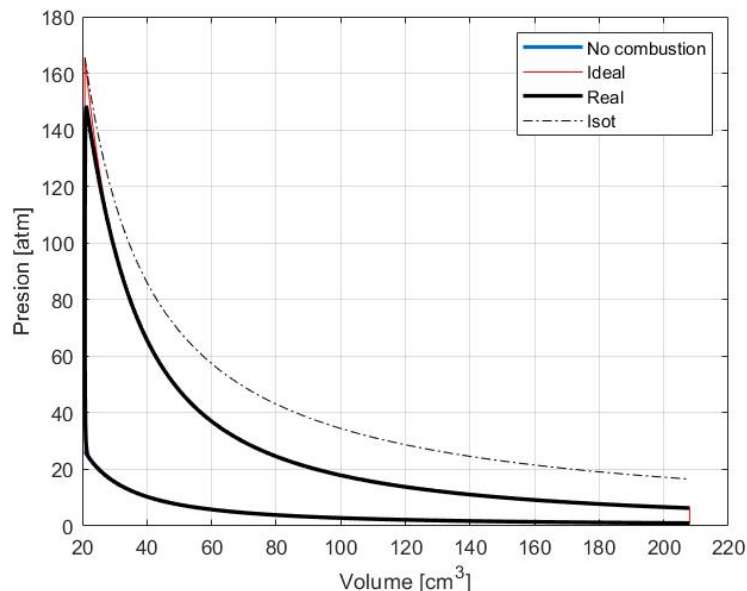


Figura 20. Diagrama P-V optimizado del modelo híbrido 1. Fuente: propia.

Para el último caso de modelo de combustión, el segundo modelo híbrido, tras las iteraciones necesarias se ha obtenido un avance de la combustión óptimo de 18º, con un trabajo de 425,555 J y el diagrama P-V de la Figura 21.

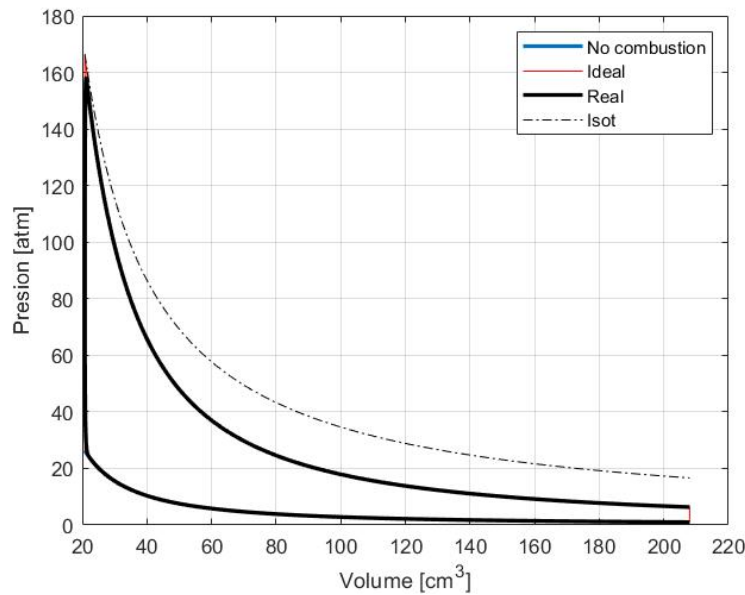


Figura 21. Diagrama P-V optimizado del modelo híbrido 2. Fuente: propia.

Se puede observar en los gráficos anteriores cómo, al hibridar los combustibles, estos modelos de combustión aumentan su velocidad de quemado y, por tanto, sus pendientes aumenten también. Esto provoca que sus diagramas P-V aparezcan representados casi a la par que el diagrama P-V ideal y permita obtener mayor rendimiento del motor utilizado. En cambio, el avance de inicio de combustión necesario para conseguir un diagrama P-V lo más cercano posible al ideal, con el modelo de combustión de gasolina, es un avance de encendido mayor, el cual habría que estudiar más a fondo debido a los problemas asociados que éste puede presentar.

### 5.3 ESTIMACIÓN PRELIMINAR DEL RENDIMIENTO DEL MOTOR

Al obtener en cada caso un diagrama diferente con diferentes trabajos finales, para poder efectuar una comparación se ha considerado importante conocer una estimación del rendimiento del motor que permita saber si están realmente “optimizados” (entendiendo siempre que los rendimientos de los motores de combustión no son, ni de cerca, parecidos al 100%).

Se sobreentiende que este porcentaje extraído de Matlab no se acerca al rendimiento real, ya que además de los cálculos de pérdidas de calor incluidos en el código “Engines Simulation Toolbox”, el rendimiento de un motor depende de muchas más variables. De todas maneras, es un dato que sirve para la comparación preliminar entre estos tres tipos de motor.

Así pues, en este caso se usará la ecuación (39), que permite calcular el rendimiento como la relación entre el trabajo efectivo generado por el motor y el calor generado por la combustión del combustible en cuestión.

$$\eta [\%] = \frac{W_{final} [W]}{PCI \left[ \frac{J}{kg} \right] \cdot m_{combustible} [kg]} \cdot 100 \quad (39)$$

Tabla 16. Comparación de los rendimientos calóricos para los tres casos de estudio. Fuente: propia.

|                  | Trabajo [W] | Calor [J] | Rendimiento [%] |
|------------------|-------------|-----------|-----------------|
| <b>Gasolina</b>  | 442,171     | 730,329   | 60,54           |
| <b>Híbrido 1</b> | 421,619     | 691,969   | 60,93           |
| <b>Híbrido 2</b> | 425,555     | 695,973   | 61,52           |

## CAPÍTULO 6: SIMULACIÓN DEL MOTOR COMPLETO

### 6.1 SIMULACIÓN DEL MOTOR

Para finalizar el apartado de diseño, el último paso consiste en simular el comportamiento del motor en las tres condiciones estudiadas con anterioridad. Con este fin, se utilizará el programa del que se ha hablado en el apartado 3.3, llamado “*Lotus engine simulation*”. Este software está desarrollado para simular el comportamiento y las características de diferentes motores de vehículos, tanto de calle como de competición, y debido a su facilidad de uso y los recursos de los que se dispone es el programa ideal para este proyecto.

Para empezar se deben dar las características conocidas del motor (Figura 10), para poder simular mediante los conocimientos de la marca “*Lotus*”, el resto de características que se adaptan mejor a nuestro caso, como se ha mostrado en el apartado 3.3. En cuanto a los sistemas de admisión y escape, se han escogido los más simples que permite el programa ya que nuestro grupo electrógeno no dispone de ningún sistema adicional.

Una vez se han introducido las características físicas del motor, se deben escoger las características del fuel utilizado. En este apartado, para el caso de la gasolina no existe ninguna complicación ya que se pueden utilizar la gasolina predefinida por el software y el modelo de combustión de Wiebe comentado en el apartado 4.3.2 (Figura 22 y Figura 23). Para los otros dos casos, en cambio, se necesitan modelos de combustión específicos, al no tener el programa ningún método de mezcla de combustibles. Para solucionar este problema se ha decidido usar el método manual de entrada de los datos, en el que tiene un papel muy importante el programa de Matlab usado en los apartados 5.1.3 y 5.1.4. Este método, existente en el programa de “*Lotus*” consiste en alimentar el software con la relación que existe entre presión en el cilindro cuando ocurre la expansión y sus ángulos de cigüeñal (Figura 24, Figura 25 y Figura 26).

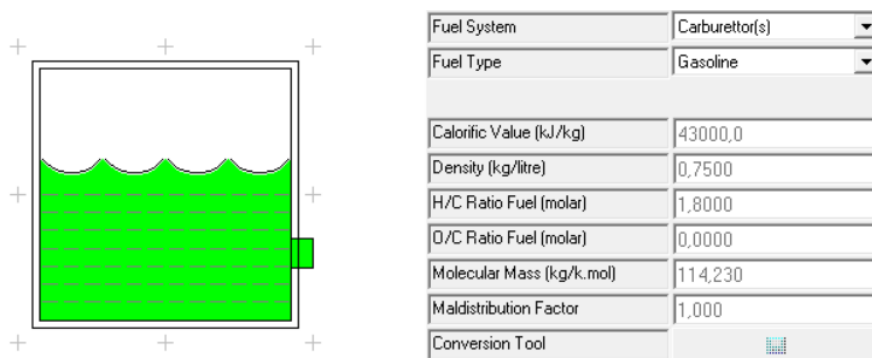


Figura 22. Características predeterminadas de la gasolina. Fuente: propia.

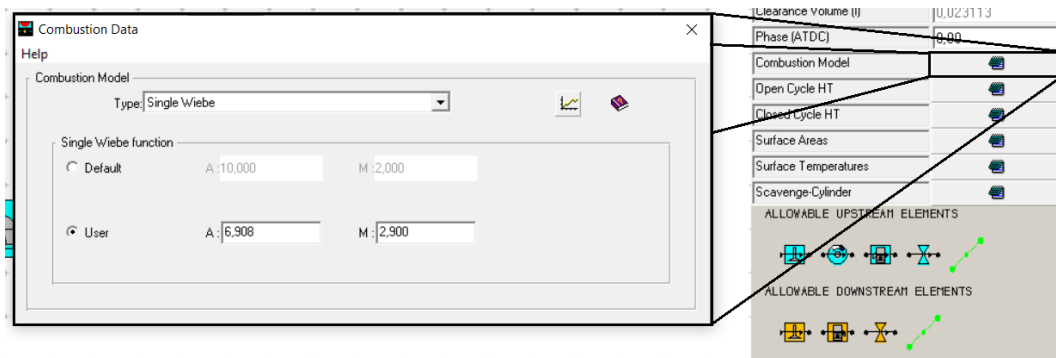


Figura 23. Modelo de combustión propio introducido en el programa. Fuente: propia.



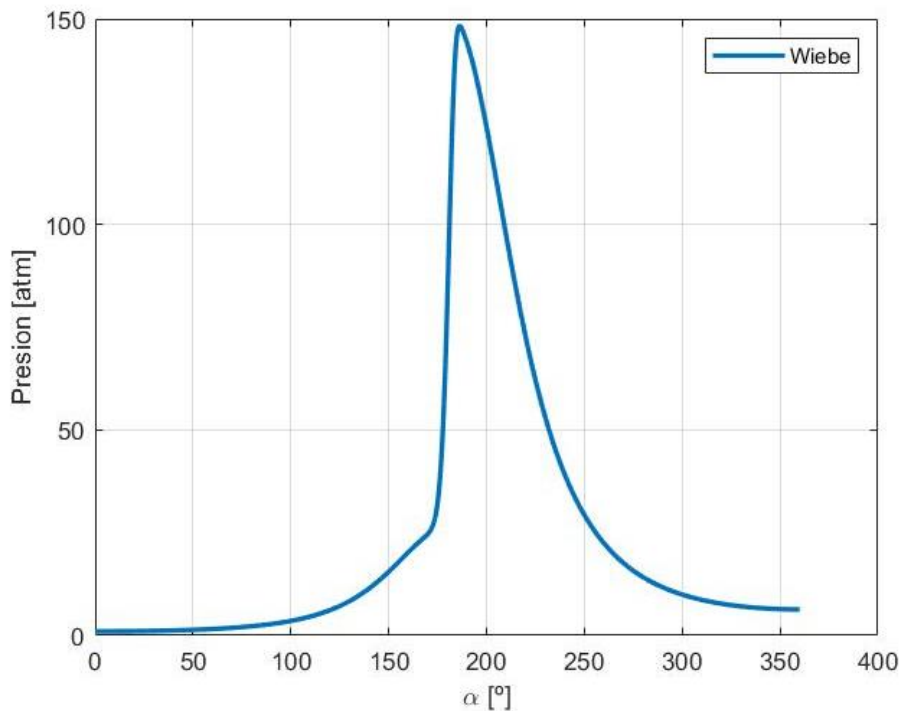


Figura 24. Ejemplo de gráfico Presión vs.  $\alpha$  Cigüeñal. Fuente: propia.

BURN - Combustion Analysis Tool

File Text Results Graphical Results Help

General Data Pressure Values Text Results Graphical Results

Title:

---

Cycle/Ignition Type:  Speed (rpm):

---

Bore (mm):  Stroke (mm):  Rod Length (mm):  Piston Pin Offset (mm):  Comp. Ratio:

---

Clearance Volume Option:  Clearance Volume (mm<sup>3</sup>):

---

Pressure Data Offset Option:  Pressure Offset (bar):

---

TDC Angle (deg):  Ignition Angle (deg) [+ve BTDC]:

Valve Timing: IVD (deg):  IVC (deg):  EVO (deg):  EVC (deg):

Figura 25. Introducción de los datos generales del modelo de combustión. Fuente: propia.

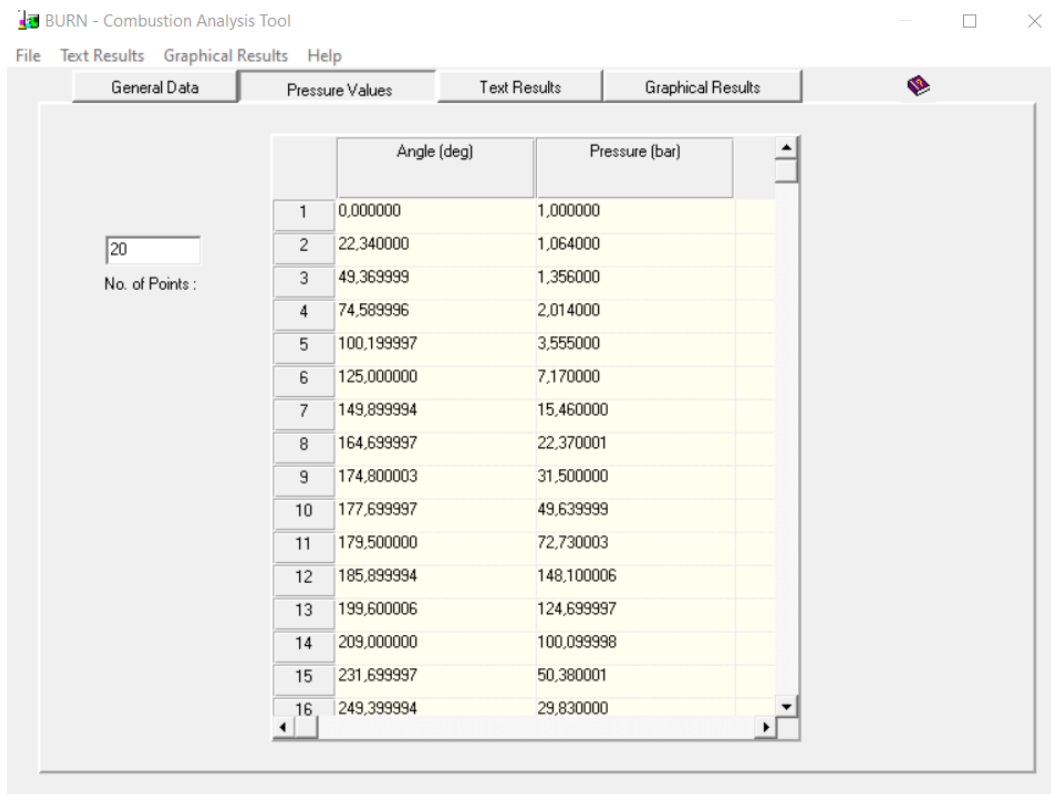


Figura 26. Introducción de los datos de presión del modelo de combustión. Fuente: propia.

De esta manera se dota al software del modelo de combustión utilizado en cada caso (Figura 27) y, a partir de aquí, éste puede trabajar.

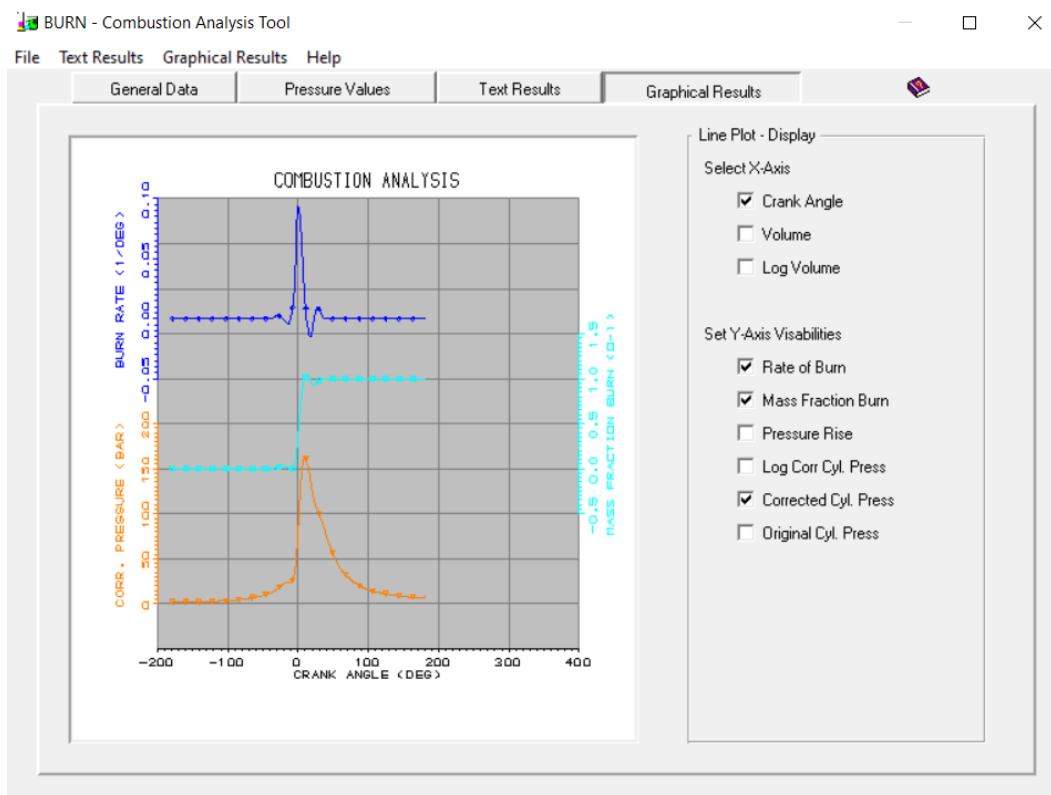


Figura 27. Resumen del modelo de combustión introducido en el software. Fuente: propia.

### 6.1.1 SIMULACIÓN DEL MOTOR PARA EL MODELO DE COMBUSTIÓN DE GASOLINA

El software utilizado para este fin tiene múltiples posibilidades y de él se pueden extraer infinitos datos acerca del motor. En estos apartados, sin embargo, sólo se expondrán los datos extraídos que se han considerado útiles para el estudio planteado en este proyecto.

Tabla 17. Resumen de resultados de la simulación del motor de combustión de gasolina. Fuente: propia

| Condiciones de operación        |           |                                    |                  |
|---------------------------------|-----------|------------------------------------|------------------|
| Vel. del motor [rpm]            | 3000      | Humedad específica [kg/kg]         | 0,015            |
| Ratio de equivalencia           | 1,00      | Pres. en admisión [bar]            | 1                |
| Pres. ambiente [bar]            | 1         | Temp. en admisión                  | 20               |
| Temp. ambiente [°C]             | 20        | Fricción mecánica                  | Predet. gasolina |
| Resultados                      |           |                                    |                  |
| Admisión [kg]                   | 0,2221e-3 | Escape [kg]                        | 0,2231e-3        |
| Caudal de admisión [kg/s]       | 0,5553e-2 | Caudal de escape [kg/s]            | 0,5577e-2        |
| Caudal de aire [kg/s]           | 0,5197e-2 | Eficiencia vol. [%]                | 84,1             |
| Combustible por ciclo [kg]      | 0,1426e-4 |                                    |                  |
| Rendimiento                     |           |                                    |                  |
| Eficiencia mec. [%]             | 89,7      | Potencia indicada [kW]             | 5,98             |
| Eficiencia térmica indicada [%] | 39,1      | Potencia de frenado [kW]           | 5,37             |
| Torque indicado [Nm]            | 19,04     | Torque de frenado [Nm]             | 17,08            |
| Potencia de fricción [kW]       | 0,62      | Perdidas de calor en cilindro [kW] | 2,86             |

Además, el software utilizado cuenta con una herramienta de cálculo de emisiones (Tabla 18) que puede servir de orientación y comparación con lo estimado en apartados anteriores (4.2.5).

Tabla 18. Resumen de gases de escape emitidos por el motor de combustión de gasolina. Fuente: propia.

| Gases de escape en la primera apertura de válvulas |            |                          |            |                        |            |
|--|------------|--------------------------|------------|------------------------|------------|
| CO <sub>2</sub> [kg]                               | 0,46945e-4 | CO [kg]                  | 0,23187e-6 | O <sub>2</sub> [kg]    | 0,21454e-6 |
| N <sub>2</sub> [kg]                                | 0,16522e-2 | H <sub>2</sub> O [kg]    | 0,1902e-4  | Fuel [kg]              | 0,14260e-7 |
| CO <sub>2</sub> [% Dry]                            | 15,341     | CO [% Dry]               | 0,119      | O <sub>2</sub> [% Dry] | 0,096      |
| N <sub>2</sub> [% Dry]                             | 84,411     | H <sub>2</sub> O [% Dry] | 15,184     | Fuel [% Dry]           | 0,18e-2    |
| Gases de escape el último cierre de válvulas       |            |                          |            |                        |            |
| CO <sub>2</sub> [kg]                               | 0,19339e-5 | CO [kg]                  | 0,95532e-8 | O <sub>2</sub> [kg]    | 0,47877e-4 |
| N <sub>2</sub> [kg]                                | 0,16522e-3 | H <sub>2</sub> O [kg]    | 0,23455e-5 | Fuel [kg]              | 0,14264e-4 |
| CO <sub>2</sub> [% Dry]                            | 0,583      | CO [% Dry]               | 0,005      | O <sub>2</sub> [% Dry] | 19,857     |
| N <sub>2</sub> [% Dry]                             | 77,896     | H <sub>2</sub> O [% Dry] | 1,728      | Fuel [% Dry]           | 1,6573     |

Para finalizar, se debe tener en cuenta que, al conectar elementos al motor del grupo electrógeno simulado, éste varía su velocidad de rotación. Por ello, se han decidido simular cuatro valores de RPM distintos para conocer su influencia en el rendimiento del motor (Tabla 19).

Tabla 19. Resumen de rendimientos del motor de combustión de gasolina. Fuente: propia

| Resumen de rendimientos |                          |                        |                     |
|-------------------------|--------------------------|------------------------|---------------------|
| RPM                     | Potencia de frenado [kW] | Torque de frenado [kW] | Eficiencia vol. [%] |
| 2000                    | 3,68                     | 17,55                  | 86,0                |
| 2500                    | 3,66                     | 13,97                  | 70,6                |
| 3000                    | 5,37                     | 17,08                  | 84,1                |
| 3500                    | 5,76                     | 15,73                  | 79,9                |

### 6.1.2 SIMULACIÓN DEL MOTOR PARA EL MODELO DE COMBUSTIÓN HÍBRIDA (PARTE 1)

Se muestran a continuación (Tabla 20 y Tabla 21) los datos y resultados de mayor importancia relativos al modelo de combustión híbrida 1.

Tabla 20. Resumen de resultados de la simulación del motor de combustión híbrida 1. Fuente: propia.

| Condiciones de operación        |           |                                    |                  |
|---------------------------------|-----------|------------------------------------|------------------|
| Vel. del motor [rpm]            | 3000      | Humedad específica [kg/kg]         | 0,015            |
| Ratio de equivalencia           | 1,00      | Pres. en admisión [bar]            | 1                |
| Pres. ambiente [bar]            | 1         | Temp. en admisión                  | 20               |
| Temp. ambiente [°C]             | 20        | Fricción mecánica                  | Predet. gasolina |
| Resultados                      |           |                                    |                  |
| Admisión [kg]                   | 0,2195e-3 | Escape [kg]                        | 0,2198e-3        |
| Caudal de admisión [kg/s]       | 0,5488e-2 | Caudal de escape [kg/s]            | 0,5495e-2        |
| Caudal de aire [kg/s]           | 0,5136e-2 | Eficiencia vol. [%]                | 83,1             |
| Combustible por ciclo [kg]      | 0,1409e-4 |                                    |                  |
| Rendimiento                     |           |                                    |                  |
| Eficiencia mec. [%]             | 89,9      | Potencia indicada [kW]             | 6,09             |
| Eficiencia térmica indicada [%] | 40,17     | Potencia de frenado [kW]           | 5,47             |
| Torque indicado [Nm]            | 19,38     | Torque de frenado [Nm]             | 17,42            |
| Potencia de fricción [kW]       | 0,62*     | Perdidas de calor en cilindro [kW] | 2,80             |

(\*): Al no disponer el programa de una opción para hibridar combustibles, la potencia de fricción se ha estimado mediante valores de la gasolina y, por tanto, no se puede tomar en cuenta en este apartado.

Tabla 21. Resumen de rendimientos del motor de combustión de híbrida 1. Fuente: propia.

| Resumen de rendimientos |                          |                        |                     |
|-------------------------|--------------------------|------------------------|---------------------|
| RPM                     | Potencia de frenado [kW] | Torque de frenado [kW] | Eficiencia vol. [%] |
| 2000                    | 3,79                     | 18,10                  | 85,2                |
| 2500                    | 3,72                     | 14,23                  | 70,1                |
| 3000                    | 5,47                     | 17,42                  | 83,1                |
| 3500                    | 6,84                     | 18,66                  | 90,9                |

### 6.1.3 SIMULACIÓN DEL MOTOR PARA EL MODELO DE COMBUSTIÓN HÍBRIDA (PARTE 1)

Al igual que en los apartados anteriores, en este se muestran los datos de mayor importancia relativos al modelo de combustión híbrida 2 (Tabla 22 y Tabla 23).

**Tabla 22.** Resumen de resultados de la simulación del motor de combustión híbrida 2. Fuente: propia.

| Condiciones de operación        |           |                                    |                  |
|---------------------------------|-----------|------------------------------------|------------------|
| Vel. del motor [rpm]            | 3000      | Humedad específica [kg/kg]         | 0,015            |
| Ratio de equivalencia           | 1,00      | Pres. en admisión [bar]            | 1                |
| Pres. ambiente [bar]            | 1         | Temp. en admisión                  | 20               |
| Temp. ambiente [°C]             | 20        | Fricción mecánica                  | Predet. gasolina |
| Resultados                      |           |                                    |                  |
| Admisión [kg]                   | 0,2205e-3 | Escape [kg]                        | 0,2215e-3        |
| Caudal de admisión [kg/s]       | 0,5512e-2 | Caudal de escape [kg/s]            | 0,5538e-2        |
| Caudal de aire [kg/s]           | 0,5158e-2 | Eficiencia vol. [%]                | 83,5             |
| Combustible por ciclo [kg]      | 0,1416e-4 |                                    |                  |
| Rendimiento                     |           |                                    |                  |
| Eficiencia mec. [%]             | 89,9      | Potencia indicada [kW]             | 6,10             |
| Eficiencia térmica indicada [%] | 38,96     | Potencia de frenado [kW]           | 5,49             |
| Torque indicado [Nm]            | 19,42     | Torque de frenado [Nm]             | 17,46            |
| Potencia de fricción [kW]       | 0,62*     | Perdidas de calor en cilindro [kW] | 2,80             |

(\*): Al no disponer el programa de una opción para hibridar combustibles, la potencia de fricción se ha estimado mediante valores de la gasolina y, por tanto, no se puede tomar en cuenta en este apartado.

**Tabla 23.** Resumen de rendimientos del motor de combustión de híbrida 2. Fuente: propia

| Resumen de rendimientos |                          |                        |                     |
|-------------------------|--------------------------|------------------------|---------------------|
| RPM                     | Potencia de frenado [kW] | Torque de frenado [Nm] | Eficiencia vol. [%] |
| 2000                    | 3,79                     | 18,07                  | 86,0                |
| 2500                    | 3,77                     | 14,40                  | 70,6                |
| 3000                    | 5,49                     | 17,46                  | 83,5                |
| 3500                    | 5,91                     | 16,14                  | 79,7                |

## CAPÍTULO 7: PRESUPUESTO

Con el objetivo de establecer un coste orientativo de la elaboración del proyecto presentado en este documento, se ha elaborado el presupuesto que a continuación se detalla:

| PRESUPUESTO                                |   |                  |      |                    |
|--|---|------------------|------|--------------------|
| <b>Costes de investigación</b>             |   |                  |      |                    |
| Concepto                                   | Descripción   | Precio/ud (€/ud) | Uds. | Precio             |
| <i>Ingeniería</i>                          |   |                  |      |                    |
| Ingeniero Junior                           | Estudiantes del MUEA                                  | 30               | 210  | 6.300,00 €         |
| Ingeniero Senior                           | Tutor del TFM   | 50               | 10   | 500,00 €           |
| <i>Productos</i>                           |   |                  |      |                    |
| Artículos Científicos                      | Artículos usados para llevar a cabo el proyecto       | 66               | 25   | 1.650,00 €         |
| <b>Subtotal</b>                            |   |                  |      | <b>8.450,00 €</b>  |
| <b>Costes de desarrollo</b>                |   |                  |      |                    |
| Concepto                                   | Descripción   | Precio/ud (€/ud) | Uds. | Precio             |
| <i>Ingeniería</i>                          |   |                  |      |                    |
| Ingeniero Junior                           | Estudiantes del MUEA                                  | 30,00            | 588  | 17.640,00 €        |
| Ingeniero Senior                           | Tutor del TFM   | 50,00            | 30   | 1.500,00 €         |
| Soporte Ingeniería                         | Ingeniero electrónico externo                         | 60,00            | 10   | 600,00 €           |
| <i>Productos</i>                           |   |                  |      |                    |
| Grupo electrógeno                          | Motor sobre el que se ha desarrollado el proyecto     | 136,75           | 1    | 136,75 €           |
| CPU Arduino                                | Placa base para el desarrollo del sistema de medición | 22,8             | 1    | 22,80 €            |
| Protoboard                                 | Placa de conexiones de Arduino                        | 4,95             | 1    | 4,95 €             |
| DHT11                                      | Sensor de Temperatura y Humedad                       | 2,35             | 1    | 2,35 €             |
| MQ-7                                       | Sensor de CO  | 5,2              | 1    | 5,20 €             |
| MQ-8                                       | Sensor de Hidrógeno                                   | 10,95            | 1    | 10,95 €            |
| YF-S401                                    | Caudalímetro  | 9,86             | 1    | 9,86 €             |
| Tubo                                       | Tubo de aluminio                                      | 15               | 1    | 15,00 €            |
| Mecanizado de tubo                         | Fresador  | 38               | 2    | 76,00 €            |
| Caja de Hardware                           | Caja donde se alojan la CPU y la Protoboard           | 10               | 1    | 10,00 €            |
| <b>Subtotal</b>                            |   |                  |      | <b>20.033,86 €</b> |
| <b>Costes de elaboración de la memoria</b> |   |                  |      |                    |
| Concepto                                   | Descripción   | Precio/ud (€/ud) | Uds. | Precio (€)         |
| <i>Ingeniería</i>                          |   |                  |      |                    |
| Ingeniero Junior                           | Estudiantes del MUEA                                  | 30               | 60   | 1.800,00 €         |
| <b>Subtotal</b>                            |   |                  |      | <b>1.800,00 €</b>  |
| <b>TOTAL</b>                               |   |                  |      | <b>30.283,86 €</b> |











## CAPÍTULO 9: CONCLUSIONES

En este apartado se debatirán y se reflexionará acerca de los resultados obtenidos en las múltiples pruebas llevadas a cabo en la totalidad del proyecto. Por un lado, se discutirá la viabilidad y el posible desarrollo del conjunto de sensores estudiado y por el otro, la afectación de la inyección de hidrógeno sobre el rendimiento y otros aspectos importantes del motor.

### 9.1 SENSOR

Al inicio de este proyecto se planteó la idea de desarrollar un sistema capaz de realizar las mismas mediciones que ejecuta un sistema de medición portátil (PEMS). Estos nuevos sensores, en cambio, debían ser de bajo coste y capaces de seguir la misma secuencia que siguen los equipos profesionales, es decir, que estos puedan realizar una primera etapa de calibración, seguida por la medición del gas de interés y, posteriormente, una validación de la medición realizada.

Esta secuencia no se ha podido implementar en el equipo en cuestión debido a que al inicio del trabajo no se tuvieron en cuenta varios factores muy determinantes en el desarrollo del sistema. Entre ellos destacan la sencillez de los dispositivos de medición de bajo coste, así como las interferencias en las mediciones que estos realizan. Además, *Arduino* presenta ciertas limitaciones, no solo en software, sino también en hardware, condicionando el desarrollo de todo el proyecto. Por otra parte, las grandes ventajas de haber empleado *Arduino* son la facilidad de programación que este presenta, la disponibilidad de hardware en el mercado y su precio asequible, lo que hacía viable su utilización para un trabajo final de máster.

Con el avance del proyecto, han aparecido los distintos retos que plantea este desarrollo de sensores en concreto. El primero de ellos es la interacción entre gases medidos que tienen los sensores empleados para el desarrollo de este trabajo. Al tratarse de sensores electroquímicos de gran simpleza, éstos pueden reaccionar a distintos elementos sin ser capaces de discernir entre ellos. Este hecho complica mucho la determinación del gas que se pretende medir en concreto y requiere un volumen de trabajo y desarrollo que en ningún caso se ve compensado con resultados objetivos y de fiabilidad probada.

El otro gran reto que aparece durante el desarrollo del sistema es la calibración de los sensores. Para poder calibrar la medición que realizan los sensores de ciertos gases se necesitan atmosferas de gases con concentraciones conocidas. Estas atmosferas, en el caso del monóxido de carbono, con mayor representación en este trabajo, tienen un precio elevado, son difíciles de encontrar y pueden llegar a ser muy perjudiciales para la salud.

Así pues, se ha llegado a la conclusión de que este desarrollo no es viable para el uso al que se quería destinar puesto que, como se ha comentado en los párrafos anteriores, no se podría garantizar una medición “real” y fiable y se requeriría de una calibración previa a cada uso, que no se puede garantizar.

### 9.2 INYECCIÓN DE HIDRÓGENO

Por lo que a la inyección de hidrógeno se refiere, al inicio del proyecto, tras realizar un proceso de investigación y formación acerca del comportamiento del hidrógeno a combustión y sobre proyectos anteriores relacionados con la combustión de hidrógeno en motores de combustión interna, se esperaba obtener unos resultados muy distintos a los obtenidos finalmente.

En una primera aproximación energética se observó como la afectación de la inyección de hidrógeno no tenía un peso muy significativo en el motor del grupo electrógeno sobre el que se basa este proyecto, obteniendo una reducción del 13% de la potencia que este ofrecía al trabajar solamente con hidrógeno.

En un segundo paso se procedió a calcular la potencia ofrecida por el motor en ambas condiciones de funcionamiento híbridas, y aquí, de nuevo, los resultados fueron muy sorprendentes. La potencia que el motor desarrollaba inyectando pequeñas cantidades de hidrógeno no se veía tan afectada como se esperaba. Por el contrario, y después de desarrollar el apartado de cálculos de emisiones tampoco tenía una gran afectación sobre las emisiones de monóxido de carbono.

Por otro lado, si se observan las emisiones de dióxido de carbono emitidas por dicho motor bajo el funcionamiento híbrido de mayor cantidad de hidrógeno, es decir el apartado (4.2.7), se puede observar que la reducción sí es significativa. Este hecho se debe a la alta concentración de CO<sub>2</sub> que los motores de gasolina emiten a la atmosfera, copando casi el 17% de las emisiones totales. Esta reducción para este caso de estudio llega a ser de 6 miligramos por segundo. Teniendo en cuenta que la cantidad de hidrógeno inyectada es muy pequeña, se cree que inyectar hidrógeno en mayores cantidades, de hasta el 10% del volumen del cilindro, puede tener efectos muy positivos sobre la emisión de gases contaminantes, y en particular de dióxido de carbono.

Tras conocer todos estos datos y con el fin de llevar a cabo una simulación lo más cercana posible a la realidad, se desarrolló un modelo de combustión para caracterizar tanto la combustión de la gasolina, como la de la mezcla de combustibles propuesta en este documento. El modelo de combustión desarrollado para el hidrógeno describe de forma bastante realista el comportamiento de la combustión de esta hibridación, estableciendo al hidrógeno como un acelerador de la combustión de la gasolina. Si bien es cierto que las concentraciones con las que se ha estado trabajando en este proyecto, no son suficientemente grandes como para observar un gran cambio en el comportamiento del motor, son suficientes como para observar la influencia que el hidrógeno tendrá sobre la velocidad de la combustión, acelerándola.

En cambio, como se puede ver en el apartado **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, en el que se ha optimizado el avance de combustión, maximizando el trabajo obtenido de cada uno de los modelos, esto no siempre es óptimo. En el caso del modelo de combustión de gasolina, se ha podido observar cómo el intento de optimizar al máximo el diagrama P-V puede comportar otros problemas. El más importante y que se suele tener más en cuenta es la contrapresión que puede aparecer en el final de la etapa de compresión, la cual puede llegar a dañar el pistón y, por tanto, debe prestársele especial atención. En la vida real se puede observar cómo los avances de encendido no suelen ser, por normal general, tan grandes para evitar este problema. Al igual que como se ha comentado en el párrafo anterior, esta afirmación no aplica para los modelos de combustión híbrida. En estos casos, se observa como, sobre el papel, estos avances de encendido son prácticamente óptimos y no presentan los problemas del modelo de combustión de gasolina, debido a su rapidez de quemado.

Una vez desarrollado el modelo de combustión, se pudo comprobar que existen grandes diferencias entre teoría y práctica. Al extraer los valores necesarios de artículos acerca de experimentación en motores reales, existía una gran diferencia entre lo que idealmente se consideraba idóneo y lo que se ha comprobado experimentalmente que lo es. En los artículos de los cuales se han extraído los valores se hacía referencia a una experimentación exhaustiva, la cual en este proyecto no se ha podido llevar a cabo. Sin embargo, el trabajo que sí se ha podido ejecutar, el teórico, ha dejado, sobre todo, avances de inicio de la combustión muy diferentes a los extraídos experimentalmente.

Por esta razón, se decidió utilizar el software *“Lotus engine simulation”*, un programa de simulación teórica con bases experimentales. En este caso, los resultados han sido bastante parecidos a los esperados: en primer lugar, se ha verificado la mejor eficiencia de los motores híbridos, algo que ya se suponía; en segundo lugar, se ha comprobado que los valores de gases, tanto volumétricos como en peso, coinciden prácticamente con los que se habían calculado (teniendo en cuenta las eficiencias volumétricas); también se ha constatado que la densidad del hidrógeno tiene una gran afectación en la

ocupación del cilindro al haberse observado que en los casos híbridos se introduce menor masa de combustible; y por último, se ha podido chequear que el grupo electrógeno, aun teniendo un motor muy simple, está bien estudiado, ya que para sus características la velocidad de rotación escogida es la más eficiente.

La última parte a comentar del apartado **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** es la relativa a gases emitidos a la atmósfera. En el caso del motor de gasolina, se han comparado los resultados de gases emitidos extraídos del programa de “Lotus” (LES) y los resultados teóricos basados en experimentaciones bibliográficas extraídos del Excel realizado. Una vez comparados, se ha hecho patente que existen grandes diferencias entre los gases expulsados calculados teóricamente y los obtenidos a base de simulación. Esto se puede deber a que la bibliografía de la cual se han extraído los valores teóricos, posiblemente se ha hecho mediante experimentación con una mezcla rica en gasolina, con lo cual, se genera mayor cantidad de CO que en la simulación del “LES”, pero menor cantidad de CO<sub>2</sub>, debido a la falta de oxígeno presente en la combustión. En los apartados de combustibles híbridos, extraer datos de emisiones no tiene sentido, debido a que el “Lotus engine simulation” tiene limitaciones en cuanto a caracterización de combustible y no permite modelar la hibridación propuesta en este trabajo con relación a los gases de escape.

Si bien es cierto que estas conclusiones están basadas en modelos teóricos, por más parejos a la realidad que se hayan querido simular, son muy positivas por lo que a la inyección de hidrógeno se refiere, y desde el punto de vista ingenieril, la hibridación del hidrógeno con la gasolina se presenta como una muy buena alternativa a otros sistemas de propulsión.

### 9.3 TRABAJOS FUTUROS

Con la finalidad de dar continuidad al proyecto presentado, y poder realizar la parte experimental del mismo, la cual no nos ha sido posible desarrollar, se proponen los siguientes trabajos futuros en orden de realización.

1. Determinar las interferencias que existen en los sensores usados, ya que estos miden distintos gases de forma simultánea.
2. Establecer un procedimiento de calibración de los sensores en un ambiente con concentración de gases contaminantes conocido, y poder así garantizar la correcta medición del sistema propuesto.
3. Validar el modelo de combustión v.2, de forma experimental para distintas concentraciones de hidrógeno.
4. Implementar el sistema desarrollado a lo largo de este proyecto con el fin de validarlo experimentalmente, y poder establecer una correlación entre experimentación en el motor del grupo electrógeno y el desarrollo teórico, teniendo en cuenta los retos y las soluciones planteadas en este proyecto.
5. Desarrollar un sistema de inyección para poder controlar el tiempo de inyección de hidrógeno y así poder estudiar la influencia real de la inyección en un motor ICE.
6. Implementar el sistema desarrollado en un motor de un buggy, o de cualquier otro vehículo, con la finalidad de estudiar los beneficios del hibridaje de combustibles en motores de vehículos.
7. Desarrollar e implementar las posibles soluciones a los retos que plantea la inyección de hidrógeno comentadas en el apartado 3.4
8. Desarrollar un sistema de medición basado en otro tipo de sensor que permita realizar mediciones objetivas y fiables.

## AGRADECIMIENTOS

a *nuestros padres*, por su incansable ayuda y colaboración en todo lo que ha estado a su alcance.

a *Vicente de Medina*, tutor de este trabajo, por su implicación y colaboración a lo largo del desarrollo de este.

a *CT Projects*, por su ayuda en elaboración del encapsulado de la CPU de Arduino.

a *Marcos López y Gerard Bonavida*, por su ayuda en la programación de los distintos sensores.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alegret, S., del Valle, M., & Merkoçi, A. (2004). *Sensores electroquímicos: introducción a los quimiosensores y biosensores*. Bellaterra: Servei de publicacions de la Universitat Autònoma de Barcelona.
- Bernd Heid, M. L. (2017). *HYDROGEN: THE NEXT WAVE FOR ELECTRIC VEHICLES?* McKinsey & Company.
- Centro de control y prevención de enfermedades (E.E.U.U). (Julio de 2004). *Centers for disease control and prevention (U.S. department of health & human services)*. Obtenido de [www.cdc.gov/co/es/faqs.htm](http://www.cdc.gov/co/es/faqs.htm)
- Changwei Ji, S. W. (2009). *Combustion and emissions performance of a hybrid hydrogen-gasoline engine at idle and lean conditions*. Beijing University of Technology, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing, China.
- Cheng, W. (2008). 2.61 Internal Combustion Engines. Massachusetts, USA. Obtenido de <http://web.mit.edu/2.61/www/Lecture%20notes/Lec.%2009%20SI%20engine%20combustion%20I.pdf>
- de Medina Iglesias, V. C. (14 de Diciembre de 2016). *GitHub*. Obtenido de <https://github.com/CREMIT/EnginesSimulationToolbox>
- Delphi Technologies. (2020 - 2021). *Worldwide emissions standards. Passenger cars and light duty vehicles*. Obtenido de <https://www.delphi.com/innovations>
- Durgun, H. B. (2003). *Development of an empirical correlation for combustion durations in spark ignition engines*. Karadeniz Technical University, Naval Architecture Department, Trabzon, Turkey.
- F Bonatesta, B. W. (2009). *Burn angles and form factors for Wiebe function fits to mass fraction burned curves of spark ignition engine with variable valve timing*. University of Nottingham, Department of Mechanical Engineering, Nottingham, UK.
- Hydrogen Council. (2020). *Path to hydrogen competitiveness. A cost perspective*.
- Hyundai Motor España. (2020). *NEXO*.
- Industrial Scientific. (2020). *indsci.es*. Obtenido de <https://www.indsci.es/capacitaci%C3%B3n/educaci%C3%B3n-general-sobre-gas/electrochemical-sensors/>
- Jinlong Liu, C. E. (2019). *Single and double Wiebe function combustion model for a heavy-duty diesel engine retrofitted to natural-gas spark-ignition*. West Virginia University, Mechanical and Aerospace Engineering, Morgantown, WV, USA.
- Juan Manuel Pichardo. (2006). *BMW Hydrogen 7 (2006) | Hidrógeno o gasolina en el mismo motor*. Obtenido de km77: <https://www.km77.com/coches/bmw/hydrogen-7-prototipo/informacion>
- L. R. Sassykova, Y. A. (2018). *The Main Components of Vehicle Exhaust Gases and Their Effective Catalytic Neutralization*. Al-Farabi Kazakh National University & Korkyt Ata Kyzylorda University, Department of Mechanical Engineering & Department Automobile Engineering. ORIENTAL JOURNAL OF CHEMISTRY.

- Manha, W. D. (2009). *Safety Design for Space Systems*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750685801000208>
- Red Hat. (2020). *redhat.com*. Obtenido de <https://www.redhat.com/es/topics/middleware/what-is-ide>
- Sara McAllister, J.-Y. C.-P. (2011). *Fundamentals of Combustion Processes*. Springer.
- Sun Bai-gang, T. H.-y.-s. (2013). *The distinctive characteristics of combustion duration in hydrogen internal combustion engine*. Bijing Institute of Technology, School of Mechanical Engineering, Beijing, China.
- Verhelst, S. (2004 - 2005). *A Study of the Combustion in Hydrogen-Fuelled Internal Combustion Engines*. Ghent University - UGent, Gent.
- Yaodong Du, X. Y. (2015). *Research on combustion and emission characteristics of a lean burn gasoline engine with hydrogen direct-injection*. Jilin University, College of Automotive Engineering, Changchun, China.
- Yeliana, C. C. (2008). *WIEBE FUNCTION PARAMETER DETERMINATION FOR MASS FRACTION BURN CALCULATION IN AN ETHANOL-GASOLINE FUELLED SI ENGINE*. Michigan Technological University, Mechanical Engineering-Engineering Mechanics, Houghton, Michigan, USA.
- Yeliana, Cooney, C., Worm, J., Michalek, D., & Naber, J. (2011). *Estimation of double-Wiebe function parameters using least square method for burn durations of ethanol-gasoline blends in spark ignition engine over variable compression ratios and EGR levels*. Michigan Technological University, Department of Mechanical Engineering - Engineering Mechanics, Houghton, USA.
- Yousufuddin, D. S. (2017). *EFFECT OF COMBUSTION DURATION ON THE OPERATING AND PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF A HYDROGEN-ETHANOL DUAL FUELED ENGINE: AN EXPERIMENTAL ANALYSIS*. Jubail University College, Department of Mechanical Engineering, Jubail.



ANEXOS

ANEXO 1: IMPLEMENTACIÓN DEL SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD

Para poder conectar el sensor DHT11 a Arduino y leer los datos necesarios, se deben realizar las conexiones necesarias entre el sensor y la placa de Arduino (Figura 28), así como conectar la placa de Arduino a un PC mediante un cable USB.

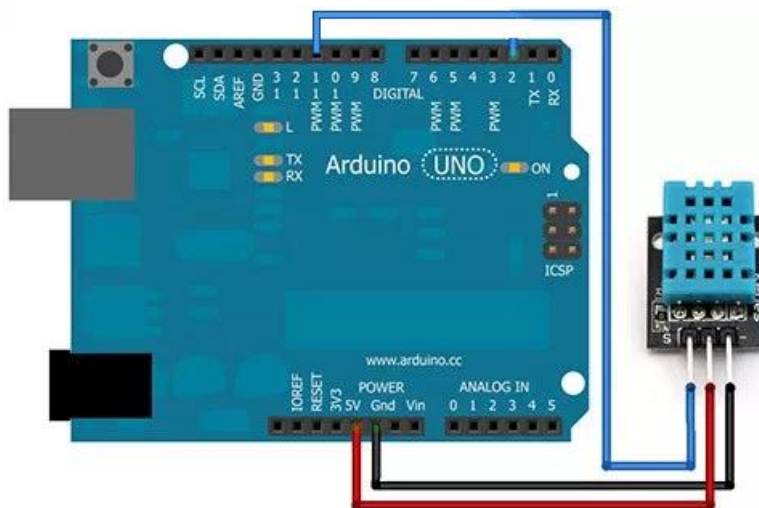


Figura 28. Esquema de conexiones del DHT11. Fuente: aprendiendoarduino.com

Una vez realizadas las conexiones pertinentes, se debe ir al editor de código para preparar el programa. El primer paso a seguir es dirigirse a la pestaña “Programa”, “Incluir Librería” y “Gestionar Librerías”. Tras esto se deben instalar e incluir las librerías: “DHT sensor library by Adafruit” y “Adafruit Unified Sensor by Adafruit”. Al instalar estas librerías se puede proceder a la escritura del código, que será el siguiente:

```

1. #include <DHT.h>
2. #include <DHT_U.h>
3. //variables necesarias
4. int SENSOR = 11; //pin digital de conexión del sensor
5. int TEMPERATURA;
6. int HUMEDAD;
7. DHT dht(SENSOR,DHT11); //(pin del sensor, tipo de sensor)
8.
9. void setup() {
10. //iniciaciones
11. Serial.begin(9600);
12. dht.begin();
13. }
14.
15. void loop() {
16. //lecturas
17. TEMPERATURA = dht.readTemperature();
18. HUMEDAD = dht.readHumidity();
19. //resultados
20. serial.print("Temperatura: ");
21. serial.print(TEMPERATURA);
22. serial.print("°C - Humedad: ");
23. serial.print(HUMEDAD);
24. serial.println("%");
25. delay(500);
26. }
    
```

ANEXO 2: IMPLEMENTACIÓN DEL SENSOR DE MONÓXIDO DE CARBONO

Este sensor MQ-7 tiene cierta complejidad a la hora de ser conectado, ya que necesita ser alimentado alternativamente a 5V (60 segundos) y 1,4V (90 segundos), para poder estabilizarse y medir eficazmente al término de estos últimos (Figura 29). Cuenta con dos cables de alimentación: uno positivo, que se debe conectar a una salida PWM de la placa de Arduino (la salida de alimentación normal de 5V es fija y no puede aportar 1,4V), y otro negativo que se debe conectar a “tierra” en la misma placa. Además de éstos, cuenta con dos pines de datos: uno analógico y uno digital. En el caso que a este proyecto incumbe, se debe usar el pin analógico, ya que éste permite la lectura de valores de cantidad de gas, no solamente su detección y, por tanto, conectarlo al pin de entrada analógico que se desee utilizar de la placa Arduino (Figura 30).

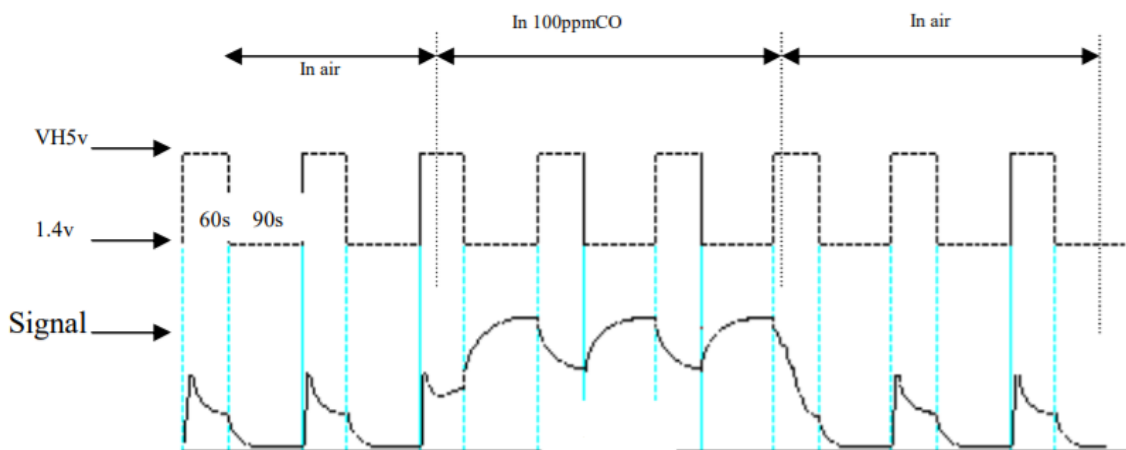


Figura 29. Voltaje alternativo necesario para medir con un MQ-7. Fuente: Hanwei electronics CO., LTD.

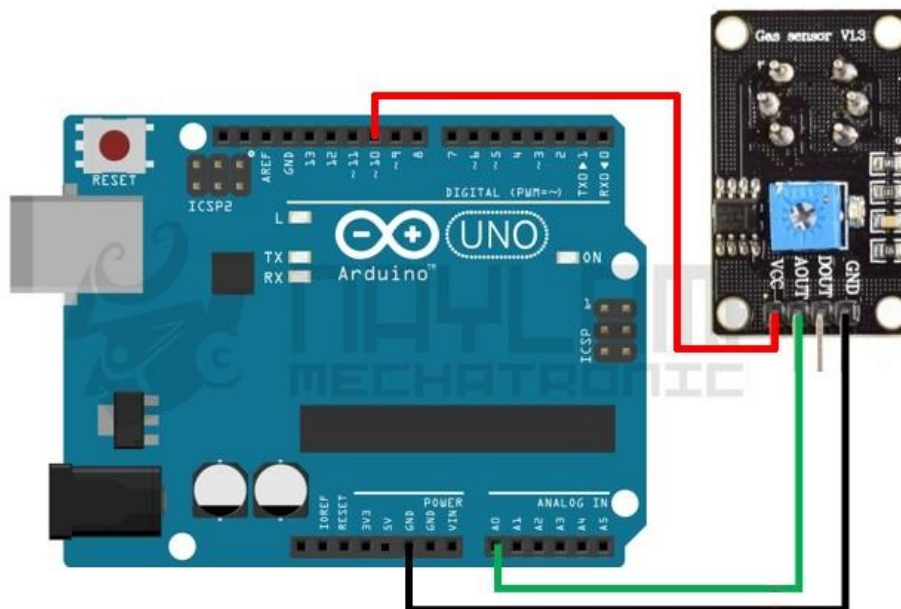


Figura 30. Esquema de conexiones del MQ-7. Fuente: Naylamp mechatronics.

Una vez realizadas las conexiones pertinentes, se puede proseguir a la creación del programa, pero en el caso de estos sensores, al tratarse de lecturas analógicas, se debe calibrar primeramente el sensor y también escalar los resultados recogidos más tarde, haciendo uso de la hoja de datos de cada sensor.

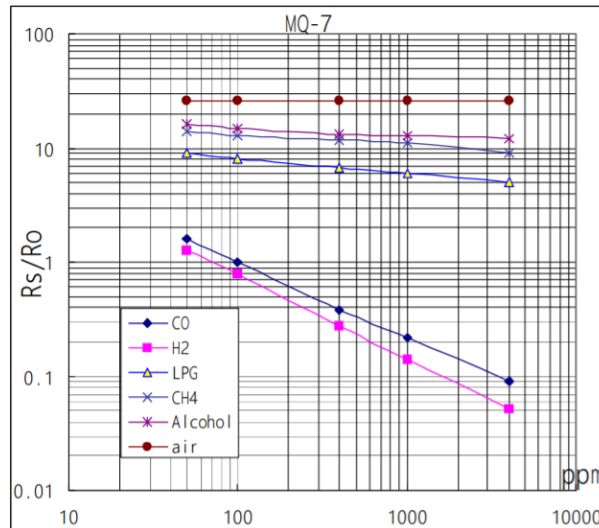


Figura 31. Curva de sensibilidad del MQ-7. Fuente: Hanwei electronics CO., LTD.

Usando la herramienta que se crea oportuna, se debe estimar la ecuación de la curva de sensibilidad (Figura 32) del gas en cuestión (CO). En este caso se ha utilizado Microsoft Excel:

$$CO [ppm] = 100,56 \cdot \left(\frac{R_s}{R_o}\right)^{-1,521} \quad (40)$$

Donde,

$R_o$  = resistencia del sensor a 100ppm de CO en aire limpio

$R_s$  = resistencia del sensor en la concentración de gas medida

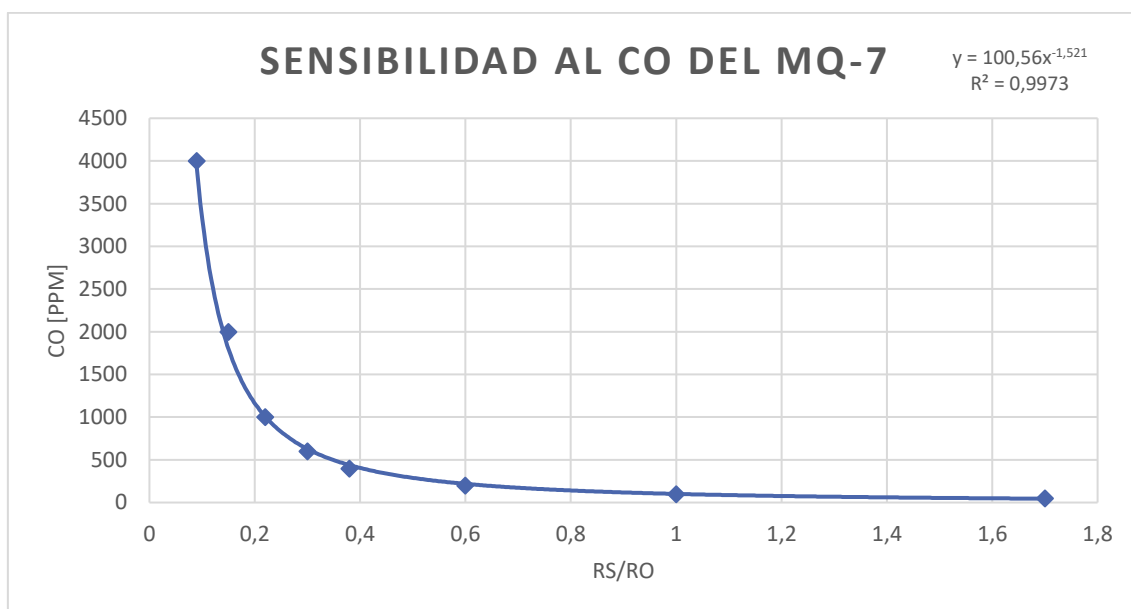


Figura 32. Aproximación de la curva de sensibilidad del CO para un MQ-7. Fuente: propia.

Una vez obtenidas la ecuación de concentración y el valor de  $R_s/R_o$  para una concentración de 100 ppm de CO (valor conocido al que se someterá al sensor a la hora de calibrar), se puede proceder a la escritura del código para obtener el valor de  $R_o$ , que permitirá después, calcular la concentración. Con este fin, se debe usar también la siguiente ecuación:

$$\frac{R_s}{R_L} = \frac{V_{alim} - V_{leído}}{V_{leído}} \quad (41)$$

Donde,

$V_{alim} = 5 V$  (voltaje de alimentación)

$V_{leído}$ : voltaje recibido por la entrada analógica

$R_L = 10k$  (resistencia de carga)

```

1. //variables y constantes
2.     int sensorInput = 10;
3.     int sensorOutput = A0;
4.     int voltaje = 255; //255 es 5V y 71 es 1.4V
5.     float RL=10000; //10k ohm
6.     float RS;
7.     float R0;
8.     float sensorValue;
9.     float sensor_volt;
10.    long previousMillis = 0;
11.    long intervalOn = 60000; //60s a 5V
12.    long intervalOff = 90000; //90s a 1.4V
13.
14.    void setup() {
15.        pinMode(sensorInput, OUTPUT);
16.        pinMode(sensorOutput, INPUT);
17.        Serial.begin(9600);
18.    }
19.
20.    void loop() {
21.        //intervalos de 90 y 60s + medida
22.        unsigned long currentMillis = millis();
23.        if (voltaje == 255) {
24.            if(currentMillis - previousMillis > intervalOn) {
25.                previousMillis = currentMillis;
26.                voltaje = 71;
27.            }
28.        }
29.        else {
30.            if(currentMillis - previousMillis > intervalOff) {
31.                previousMillis = currentMillis;
32.                for(int x = 0 ; x < 10 ; x++){
33.                    sensorValue = sensorValue+analogRead(SensorOutput);
34.                    delay(500)
35.                }
36.                sensorValue = sensorValue/10.0;
37.                //calculos
38.                sensor_volt = sensorValue/1024*5.0;//conversion a V
39.                RS= ((5.0-sensor_volt)/sensor_volt)*RL;//RS (V-Vs)/Vs
40.                R0 = RS/1.0; //RS/R0=1 100ppm de CO
41.                //Resultados
42.                Serial.print("R0: ");
43.                Serial.print(R0);
44.                Serial.print(" Ohm");
45.                voltaje = 255;
46.            }
47.        }
48.        analogWrite(sensorInput, voltaje);//voltaje a sensor
49.    }

```

Tras la calibración, se puede proceder a la realización de las mediciones pertinentes. Para poder hacer esto, se debe usar tanto la ecuación de concentración de monóxido de carbono, como la de  $R_s$  presentadas anteriormente y a partir de la medición de  $R_s$  y el valor conocido de  $R_0$ , obtener la concentración de  $H_2$ .

```

1. //variables y constantes
2. int sensorInput = 10;
3. int sensorOutput = A0;
4. int voltaje = 255; //255 es 5V y 71 es 1.4V
5. long previousMillis = 0;
6. long intervalOn = 60000; //60s a 5V
7. long intervalOff = 90000; //90s a 1.4V
8.
9. void setup() {
10.     pinMode(sensorInput, OUTPUT);
11.     pinMode(sensorOutput, INPUT);
12.     Serial.begin(9600);
13. }
14.
15. void loop() {
16.     //intervalos de 90 y 60s + medida
17.     unsigned long currentMillis = millis();
18.     if (voltaje == 255) {
19.         if(currentMillis - previousMillis > intervalOn) {
20.             previousMillis = currentMillis;
21.             voltaje = 71;
22.         }
23.     }
24.     else {
25.         if(currentMillis - previousMillis > intervalOff) {
26.             previousMillis = currentMillis;
27.             int lectura_A0 = analogRead(sensorOutput);
28.             float voltaje = lectura_A0 * (5.0 / 1023.0);
29.             float Rs=10000*((5-voltaje)/voltaje); //w/ RL=10k
30.             float R0="x"; // R0 deducido de calibración
31.             double CO=100.56*pow(Rs/R0,-1.521); //concent.
32.             //Resultados
33.             Serial.print("voltaje:");
34.             Serial.print(voltaje);
35.             Serial.print("V - Rs:");
36.             Serial.println(Rs);
37.             Serial.print("CO:");
38.             Serial.print(CO);
39.             Serial.println(" ppm");
40.             voltaje = 255;
41.         }
42.     }
43.     analogWrite(sensorInput, voltaje); //voltaje a sensor
44. }

```

ANEXO 3: IMPLEMENTACIÓN DEL SENSOR DE HIDRÓGENO

El sensor MQ-8, es un sensor simple y útil, ya que es fácil de conectar y tiene un buen rango de detección para ser colocado en el escape y medir si en alguna medida el hidrógeno inyectado en el motor no ha combustionado (poco probable). Como se puede ver en la siguiente imagen (Figura 33), se debe alimentar el sensor con 5V y también, por otro lado, conectarlo a tierra (GND). En el caso a tratar, al necesitar los datos analógicos del sensor, se conectará la salida analógica (AOUT, de su abreviatura en inglés), a la entrada analógica correspondiente de Arduino (en este caso, A0):

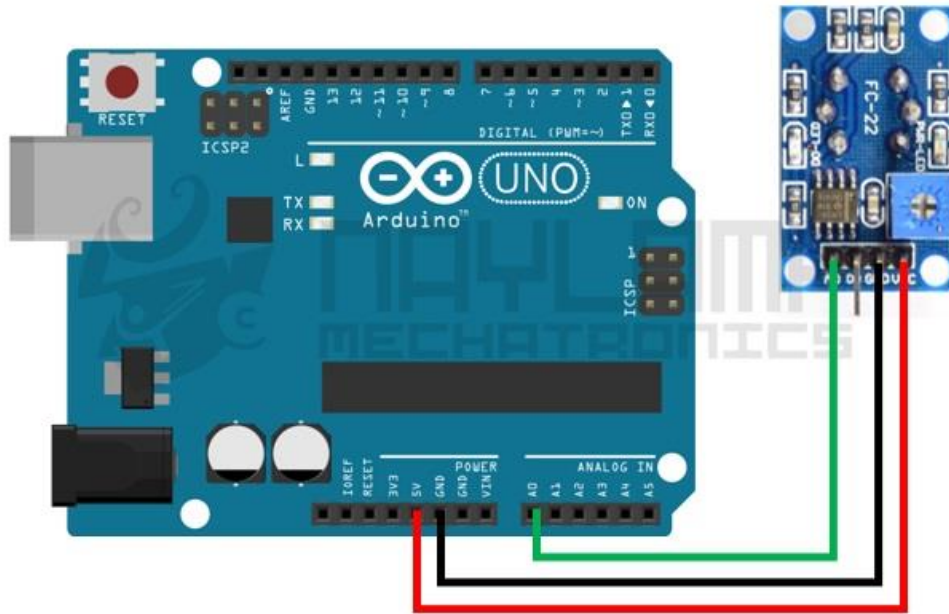


Figura 33. Curva de sensibilidad del MQ-8. Fuente: Hanwei electronics CO., LTD.

Tras esto, se puede proceder a la escritura del programa que se va a utilizar. Éste va a constar de dos partes: una que servirá para calibrar algunos datos necesarios para la medición y otra que servirá para la medición en sí.

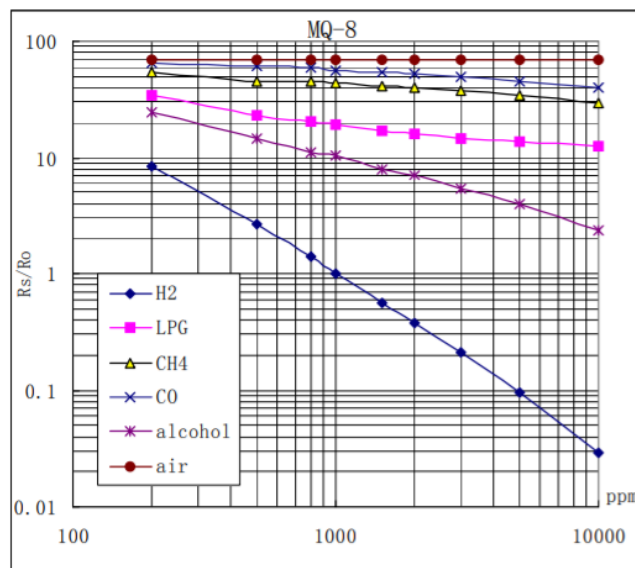


Figura 34. Curva de sensibilidad del MQ-8. Fuente: Hanwei electronics CO., LTD.

A través de la curva de sensibilidad del MQ-8 (Figura 34), se puede obtener la ecuación aproximada de concentración del hidrógeno en función de la magnitud de la resistencia electroquímica que se encuentra integrada en el sensor:

$$H_2 [ppm] = 917,14 \cdot \left(\frac{R_s}{R_0}\right)^{-0,702} \quad (42)$$

Donde,

$R_0$  = resistencia del sensor a 1000ppm de  $H_2$  en aire limpio

$R_s$  = resistencia del sensor en la concentración de gas medida

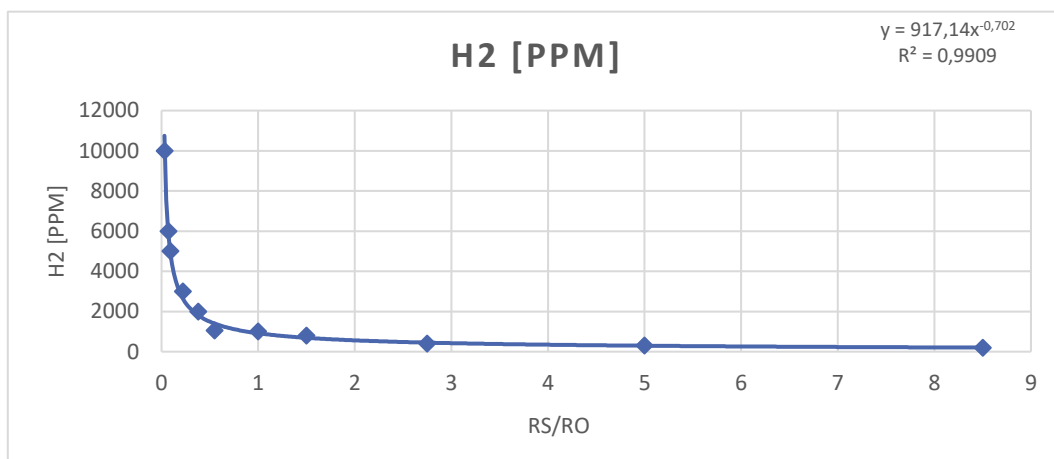


Figura 35. Aproximación de la curva de sensibilidad del  $H_2$  para un MQ-8. Fuente: propia.

Teniendo la ecuación de concentración del hidrógeno y el valor de  $R_s/R_0$  para una concentración de 1000 ppm de  $H_2$  (concentración conocida del gas para la calibración del sensor), se puede proceder a la escritura del código para obtener el valor de la constante  $R_0$ . Con este fin, se debe usar también la ecuación (41):

```

1. //variables necesarias
2. float sensor_volt;
3. float RS;
4. float R0;
5. float RL=10000; //10k ohm
6. float sensorValue;
7.
8. void setup() {
9.   Serial.begin(9600);
10. }
11. void loop() {
12.   //media de medidas para mayor exactitud
13.   for(int x = 0 ; x < 10 ; x++)
14.   {
15.     sensorValue = sensorValue + analogRead(A0);
16.     delay(500)
17.   }
18.   sensorValue = sensorValue/10.0;
19.   //calculos y resultados
20.   sensor_volt = sensorValue/1024*5.0; //A0 -> 0-1024
21.   RS = ((5.0-sensor_volt)/sensor_volt)*RL; //RL(V-Vs)/Vs
22.   R0 = RS/1.0; //RS/R0=1 para 1000ppm H2
23.   Serial.print("R0 = ");
24.   Serial.print(R0);
25.   Serial.println("Ohm");
26.   delay(1000);

```

```
27.     }
```

Una vez calibrado el sensor, se puede proceder a la realización de las mediciones pertinentes, de la misma manera que se ha hecho en el apartado anterior (ANEXO 2). A partir de la medición de  $R_s$  y el valor conocido de  $R_0$  se debe obtener la concentración de  $H_2$  mediante la ecuación extraída de la curva de sensibilidad del sensor.

```
1. void setup() {
2.   Serial.begin(9600); //iniciar monitor serial
3. }
4.
5. void loop() {
6.   //iniciacion de variables y calculos
7.   int lectura_A0 = analogRead(A0); //lectura analógica
8.   float voltaje = lectura_A0 * (5.0 / 1023.0); //lect. en V
9.   float Rs=10000*((5-voltaje)/voltaje); //Rs con RL=10k
10.  float R0="x" //valor de R0 deducido de calibración
11.  double H2=917.14*pow(Rs/R0,-0.702); //concentración de H2
12.  //Resultados
13.  Serial.print("voltaje:");
14.  Serial.print(voltaje);
15.  Serial.print("   Rs:");
16.  Serial.println(Rs);
17.  Serial.print("H2:");
18.  Serial.print(H2);
19.  Serial.println(" ppm");
20.  delay(100);
21. }
```



ANEXO 4: IMPLEMENTACIÓN DEL CAUDALÍMETRO

Como se ha comentado anteriormente, el sensor YF-S401 trabaja mediante un sensor de efecto Hall que permite medir las revoluciones por minuto de la turbina para conocer, así, el caudal. Al tratarse de un sensor compatible con Arduino, debe alimentarse con 5V de tensión y estar conectado a tierra (“GND”). El cable de datos, en este caso el amarillo, se debe conectar a una entrada digital de la placa (Figura 36). Esto se debe a que lo que se mide son pulsos, es decir, 1 o 0, marcándose así el momento en que el imán interactúa con el sensor de efecto Hall.



Figura 36. Esquema de conexiones del YF-S401. Fuente: Naylamp mechatronics.

Este sensor, al trabajar mediante pulsos, nos proporciona el caudal según la ecuación (43):

$$Q \left[ \frac{L}{min} \right] = \frac{f [Hz]}{K} \tag{43}$$

Donde,

$Q$ : caudal en  $\frac{L}{min}$

$f$ : frecuencia de pulsos detectada por el sensor en Hz

$K$ : factor de conversión proveído por el fabricante

Según el fabricante, el litro equivale a 5880 pulsos, con lo cual, el factor K tiene un valor de  $98 \frac{pulsos \cdot min}{L \cdot s}$

Una vez se conocen estos datos, se puede proceder a la escritura del código que servirá para obtener valores válidos de caudal y almacenarlos para ser tratados. El código usado en Arduino es el siguiente:

```

1. //Iniciar variables
2. volatile int Pulsos;
3. int Q;
4. int Sensor=2;
5. float K=98;
6.
7. void ContarPulsos () { //cuando se detecta interrupcion
8.   Pulsos++;
9. }
10.
11. void setup () {

```

```
12.     pinMode(Sensor, INPUT);
13.     Serial.begin(9600);
14.     attachInterrupt(0,ContarPulsos,RISING); //inicializa
funcion rpm en flanco de subida
15.     }
16.
17.     void loop() {
18.         Pulsos=0; //contador a 0
19.         interrupts(); //habilitamos interrupcion
20.         delay(1000); //1s de margen
21.         noInterrupts(); //deshabilitamos interrupcion
22.         Q=(Pulsos/K); //ecuación
23.         Serial.print("f = ");
24.         Serial.print(Pulsos);
25.         Serial.print(" Hz - Q = ")
26.         Serial.print(Q,DEC);
27.         Serial.println(" L/min");
28.         delay(1000);
29.     }
```

## ANEXO 5: IMPLEMENTACIÓN DEL CONJUNTO DE SENSORES

Para cada uno de los sensores se han explicado los diferentes pasos de conexión y sus códigos (ANEXO 1: Implementación del sensor de temperatura y humedad, ANEXO 2: Implementación del sensor de monóxido de carbono, ANEXO 3: Implementación del sensor de hidrógeno y ANEXO 4: Implementación del Caudalímetro) . Por ello, en este anexo sólo se presentará un ejemplo de conexión de los cuatro sensores a la vez, el mismo usado en el apartado 2.5 (Figura 37), el código de calibración para los dos en los que es necesario y el código de medición de los cuatro.

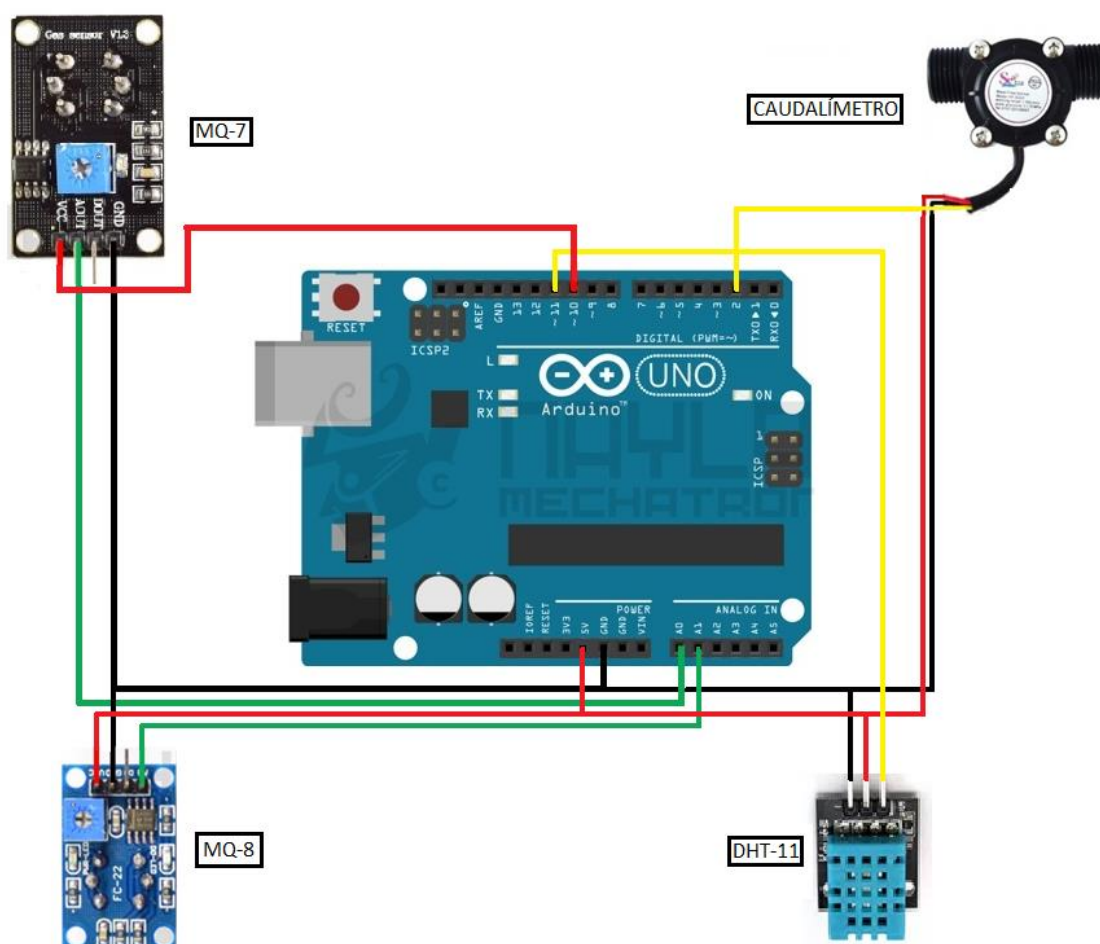


Figura 37. Conexiones de los 4 sensores. Fuente: propia.

Teniendo en cuenta que los sensores DHT-11 y el caudalímetro, están calibrados “de fábrica”, con sus respectivos parámetros, a continuación se muestra el código de calibración de los MQ-7 y MQ-8:

```

1. //variables y constantes
2.     int sensorInput = 10;
3.     int sensorOutput = A0;
4.     int voltaje = 255; //255 es 5V y 71 es 1.4V
5.     float RL7=10000; //10k ohm
6.     float RS7;
7.     float R07;
8.     float sensorValue7;
9.     float sensor_volt7;
10.    long previousMillis = 0;
11.    long intervalOn = 60000; //60s a 5V
12.    long intervalOff = 90000; //90s a 1.4V
    
```

```

13.     float sensor_volt8;
14.     float RS8;
15.     float R08;
16.     float RL8=10000; //10k ohm
17.     float sensorValue8;
18.     int MQ8=A1;
19.
20.     void setup() {
21.         pinMode(sensorInput, OUTPUT);
22.         pinMode(sensorOutput, INPUT);
23.         Serial.begin(9600);
24.     }
25.
26.     void loop() {
27.         //MQ-7
28.         //intervalos de 90 y 60s + medida
29.         unsigned long currentMillis = millis();
30.         if (voltaje == 255) {
31.             if(currentMillis - previousMillis > intervalOn) {
32.                 previousMillis = currentMillis;
33.                 voltaje = 71;
34.             }
35.         }
36.         else {
37.             if(currentMillis - previousMillis > intervalOff) {
38.                 previousMillis = currentMillis;
39.                 for(int x7 = 0 ; x7 < 10 ; x7++){
40.                     sensorValue7=sensorValue7+analogRead(sensorOutput);
41.                     delay(500);
42.                 }
43.                 sensorValue7 = sensorValue7/10.0;
44.                 //calculos
45.                 sensor_volt7 = sensorValue7/1024*5.0;
46.                 RS7= ((5.0-sensor_volt7)/sensor_volt7)*RL7
47.                 R07 = RS7/1.0;
48.                 //Resultados
49.                 Serial.print("R0_MQ7:");
50.                 Serial.print(R07);
51.                 Serial.println(" ohm");
52.                 voltaje = 255;
53.             }
54.         }
55.         analogWrite(sensorInput, voltaje); //voltaje a sensor
56.
57.         //MQ-8
58.         for(int x8 = 0 ; x8 < 10 ; x8++){
59.             sensorValue8 = sensorValue8 + analogRead(MQ8);
60.             delay(500);
61.         }
62.         sensorValue8 = sensorValue8/10.0;
63.         //calculos y resultados
64.         sensor_volt8 = sensorValue8/1024*5.0;
65.         RS8 = ((5.0-sensor_volt8)/sensor_volt8)*RL8;
66.         R08 = RS8/1.0;
67.         Serial.print("R0_MQ8= ");
68.         Serial.print(R08);
69.         Serial.println("Ohm");
70.         delay(1000);
71.     }

```

Una vez calibrados estos dos sensores, ya se pueden usar los cuatro sensores juntos, por tanto, el código será el siguiente:

```

1. #include <DHT.h>
2. #include <DHT_U.h>
3.
4. //variables y constantes
5.     int SENSOR = 11;
6.     int TEMPERATURA;
7.     int HUMEDAD;
8.     DHT dht (SENSOR, DHT11);
9.
10.    int sensorInput = 10;
11.    int sensorOutput = A0;
12.    int voltaje7 = 255;
13.    float RL7=10000;
14.    float RS7;
15.    float R07;
16.    long previousMillis = 0;
17.    long intervalOn = 60000;
18.    long intervalOff = 90000;
19.    int lectura_A0;
20.    double CO;
21.
22.    int lectura_A1;
23.    float voltaje8;
24.    float RS8;
25.    float R08;
26.    float RL8=10000;
27.    double H2;
28.
29.    volatile int Pulsos;
30.    int Q;
31.    float K=98;
32.
33.    void ContarPulsos () {
34.        Pulsos++;
35.    }
36.
37.    void setup() {
38.        pinMode(sensorInput, OUTPUT);
39.        pinMode(sensorOutput, INPUT);
40.        pinMode(2, INPUT);
41.        attachInterrupt (0,ContarPulsos,RISING);
42.        Serial.begin(9600);
43.        dht.begin();
44.    }
45.
46.    void loop() {
47.        //DHT11
48.        TEMPERATURA = dht.readTemperature();
49.        HUMEDAD = dht.readHumidity();
50.        Serial.print("Temperatura=");
51.        Serial.print(TEMPERATURA);
52.        Serial.print(" °C");
53.        Serial.print(" Humedad=");
54.        Serial.print(HUMEDAD);
55.        Serial.println(" %");
56.
57.        //MQ-7


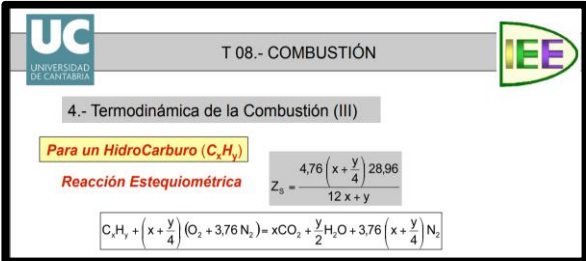
```

```


58.     unsigned long currentMillis = millis();
59.     if (voltaje7 == 255) {
60.         if(currentMillis - previousMillis > intervalOn) {
61.             previousMillis = currentMillis;
62.             voltaje7 = 71;
63.         }
64.     }
65.     else {
66.         if(currentMillis - previousMillis > intervalOff) {
67.             previousMillis = currentMillis;
68.             lectura_A0 = analogRead(sensorOutput);
69.             voltaje7 = lectura_A0 * (5.0 / 1023.0);
70.             RS7=RL7*((5-voltaje7)/voltaje7);
71.             R07=10;
72.             CO=100.56*pow(RS7/R07,-1.521);
73.             //Resultados
74.             Serial.print("CO=");
75.             Serial.print(CO);
76.             Serial.println(" ppm");
77.             voltaje7 = 255;
78.         }
79.     }
80.     analogWrite(sensorInput, voltaje7);
81.
82.     //MQ-8
83.     lectura_A1 = analogRead(A1);
84.     voltaje8 = lectura_A1 * (5.0 / 1023.0);
85.     RS8=RL8*((5-voltaje8)/voltaje8);
86.     R08=20;
87.     H2=917.14*pow(RS8/R08,-0.702);
88.     //Resultados
89.     Serial.print("H2=");
90.     Serial.print(H2);
91.     Serial.println(" ppm");
92.
93.     //Caudalimetro
94.     Pulsos=0;
95.     interrupts();
96.     delay(1000);
97.     noInterrupts();
98.     Q=(Pulsos/K);
99.     Serial.print("Q=");
100.    Serial.print(Q);
101.    Serial.println(" L/min");
102.    Serial.println("-----");
103. }

```

ANEXO 6: CÁLCULO ENERGÉTICO DE LA COMBUSTIÓN DE AMBOS COMBUSTIBLES


| TFM                 |  | SENSOR DE MEDICIÓN DE CO  |   |
|---------------------|--|---|---|
| página              | 1.1  | APROXIMACIÓN CÁLCULO ENERGÉTICO v.2   |   |
| <b>Descripción</b>  |  | Se contempló la presencia de Nitrógeno tanto en la composición del aire como en la reacción de combustión de la gasolina e hidrógeno. Se aplicó el cálculo específico de AFR para Hidrocarburos (Caso de estudio para vehículos, ya que el depósito sólo contiene H2 y la combustión es con aire atmosférico) |  |
| DATOS               |  | CÁLCULOS ESTEQUIOMÉTRICOS   |   |
| GRUPO ELECTRÓGENO   |  | MASA  |   |
| Model               | RAC3100-A                                      | GASOLINA  |   |
| Power               | 7,00 CV  | $C_8H_{18} + 12,5 \cdot O_2 + N_2 \rightarrow 8 \cdot CO_2 + 9 \cdot H_2O + N_2$  |   |
| Rated speed         | 3000,00 rpm                                    | <b>AFR (²)</b>  | <b>15,115 kgAIR:kgComb</b>  |
| Volume              | 208,00 cm³                                     | HIDRÓGENO   |   |
| Rendimiento motor   | 30,00 %  | $2 \cdot H_2 + O_2 + N_2 \rightarrow 2 \cdot H_2O + N_2$  |   |
| COMBUSTIBLE         |  | Fuel molar mass   | 4,032 grams/mol   |
| GASOLINA            |  | Oxygen molar mass   | 31,980 grams/mol  |
| Density@20°C        | 730,000 kg/m³                                  | Nitrogen molar mass   | 28,013 grams/mol  |
| PCI                 | 43950,000 kJ/kg                                | Air mass (¹)  | 137,364 grams/mol   |
| PCS                 | 46885,000 kJ/kg                                | <b>AFR (²)</b>  | <b>34,068 kgAIR:kgComb</b>  |
| Formula             | C8H18 -  | ENERGÍA   |   |
| H atomic weight     | 1,008 amu                                      | GASOLINA  |   |
| C atomic weight     | 12,011 amu                                     | Volume (1kg C8H18)  | 1369,863 cm³  |
| O atomic weight     | 15,990 amu                                     | Volume (1kg AIR)  | 830495,806 cm³  |
| HIDRÓGENO           |  | Volume (15,115kg AIR)   | 12553016,958 cm³  |
| Density@20°C        | 0,0899 kg/m³                                   | In-cyl. C8H18   | 0,0109 %  |
| PCI                 | 120011,000 kJ/kg                               | In-cyl. AIR   | 99,9891 %   |
| PCS                 | 141853,000 kJ/kg                               | In-cyl. C8H18 Volume  | 0,0227 cm³  |
| Formula             | H2 -   | <b>C8H18 Energy</b>   | <b>0,7282 kJ</b>  |
| H atomic weight     | 1,008 amu                                      | <b>C8H18 Power</b>  | <b>7,4250 CV</b>  |
| O atomic weight     | 15,990 amu                                     | HIDRÓGENO   |   |
| OXIGENO (en aire)   |  | Volume (1kg H2)   | 11123470,523 cm³  |
| O2 on air           | 21,00 %  | Volume (1kg AIR)  | 830495,806 cm³  |
| Air Density@20°C    | 1,2041 kg/m³                                   | Volume (33,861kg AIR)   | 28293653,854 cm³  |
| Formula             | O2 -   | In-cyl. H2  | 28,2199 %   |
| O atomic weight     | 15,990 amu                                     | In-cyl. AIR   | 71,7801 %   |
| NITRÓGENO (en aire) |  | In-cyl. H2 Volume   | 58,6974 cm³   |
| N2 on air           | 79,00 %  | <b>H2 Energy</b>  | <b>0,6333 kJ</b>  |
| Air Density@20°C    | 1,2041 kg/m³                                   | <b>H2 Power</b>   | <b>6,4576 CV</b>  |
| Formula             | N2 -   | Fórmula aplicada al cálculo AFR de un Hidrocarburo:   |   |
| N atomic weight     | 14,007 amu                                     |   |   |
| Universidad         | Universidad Politécnica de Cataluña - ETSEIB   |   |   |
| Autores             | Oriol Fosalba Vidal y Ricardo Gracia Madrdejós |   |   |

ANEXO 7: CÁLCULO ENERGÉTICO PARA LA HIBRIDACIÓN DE COMBUSTIBLES (PARTE 1)


| TFM                        |   | SENSOR DE MEDICIÓN DE CO                            |   |
|----------------------------|---|---|---|
| página                     | 1.3   | APROXIMACIÓN CÁLCULO ENERGÉTICO v.2                 |   |
| <b>Descripción</b>         | Hibridación de combustibles. (Cálculo para caso de estudio actual - con generador de H2 - Teniendo en cuenta la limitación del caudal del generador por electrólisis - limitando a inyectar durante el ciclo de admisión) |   |  |
| DATOS                      |   | CÁLCULOS ESTEQUIOMÉTRICOS                           |   |
| <b>GRUPO ELECTRÓGENO</b>   |   | <b>MASA</b>   |   |
| Model                      | RAC3100-A   | <b>GASOLINA</b>                                     |   |
| Power                      | 7,00 CV   | C8H18 + 12,5*O2 + N2 -> 8*CO2 + 9*H2O + N2          |   |
| Rated speed                | 3000,00 rpm   | <b>AFR (°)</b>                                      | <b>15,115 kgAIR:kgComb</b>  |
| Volume                     | 208,00 cm^3   | <b>HIDRÓGENO</b>                                    |   |
| Caudal H2                  | 95,00 l/h   | 2*H2 + O2 -> 2*H2O                                  |   |
|                            | 26,39 cm^3/s  | Fuel molar mass                                     | 4,032 grams/mol   |
| Tiempo iny. H2             | 0,01 sec  | Oxigen molar mass                                   | 31,980 grams/mol  |
| Rendimiento motor          | 30,00 %   | Air mass (°)  | 152,286 grams/mol   |
| <b>COMBUSTIBLE</b>         |   | <b>AFR (°)</b>                                      | <b>37,769 kgAIR:kgComb</b>  |
| <b>GASOLINA</b>            |   | <b>ENERGÍA</b>                                      |   |
| Density@20°C               | 730,000 kg/m^3  | <b>HÍBRIDO</b>                                      |   |
| PCI                        | 43950,000 kJ/kg   | Volume (1kg AIR)                                    | 830495,806 cm^3   |
| PCS                        | 46885,000 kJ/kg   | Volume (1kg C8H18)                                  | 1369,863 cm^3   |
| Formula                    | C8H18 -   | Volume (15,115kg AIR-C8H18)                         | 12553016,958 cm^3   |
| H atomic weight            | 1,008 amu   | Volume (1kg H2)                                     | 11123470,523 cm^3   |
| C atomic weight            | 12,011 amu  | Volume (37,769kg AIR-H2)                            | 31367223,965 cm^3   |
| O atomic weight            | 15,990 amu  | In-cyl. AIR   | 99,8622 %   |
| <b>HIDRÓGENO</b>           |   | In-cyl. C8H18                                       | 0,0109 %  |
| Density@20°C               | 0,0899 kg/m^3   | In-cyl. H2  | 0,0826 %  |
| PCI                        | 120011,000 kJ/kg  | In-cyl. O2 (°)                                      | 0,0443 %  |
| PCS                        | 141853,000 kJ/kg  | In-cyl. AIR Volume                                  | 207,7134 cm^3   |
| Formula                    | H2 -  | In-cyl. C8H18 Volume                                | 0,0227 cm^3   |
| H atomic weight            | 1,008 amu   | In-cyl. H2 Volume                                   | 0,1718 cm^3   |
| O atomic weight            | 15,990 amu  | In-cyl. O2 Volume                                   | 0,0921 cm^3   |
| <b>OXIGENO (en aire)</b>   |   | <b>C8H18 Energy</b>                                 | <b>0,7272 kJ</b>  |
| O2 on air                  | 21,00 %   | <b>H2 Energy</b>                                    | <b>0,0019 kJ</b>  |
| Air Density@20°C           | 1,2041 kg/m^3   | <b>TOTAL Energy</b>                                 | <b>0,7291 kJ</b>  |
| Formula                    | O2 -  | <b>TOTAL Power</b>                                  | <b>7,4345 CV</b>  |
| O atomic weight            | 15,990 amu  | <b>Composición del H2 obtenido por electrólisis</b> |   |
| O2 Density@20°C            | 1,331 kg/m^3  | Masa molecular H2                                   | 4,032 gramos/mol  |
| <b>NITRÓGENO (en aire)</b> |   | Masa molecular O2                                   | 31,980 gramos/mol   |
| N2 on air                  | 79,00 %   | Volumen H2  | 7,44643E-20 cm^3  |
| Air Density@20°C           | 1,2041 kg/m^3   | Volumen O2  | 3,98922E-20 cm^3  |
| Formula                    | N2 -  | <b>% en volumen H2</b>                              | <b>65,116 %</b>   |
| N atomic weight            | 14,007 amu  | <b>%en masa H2</b>                                  | <b>11,196 %</b>   |
| Universidad                | Universidad Politécnica de Cataluña - ETSEIB  |   |   |
| Autores                    | Oriol Fosalba Vidal y Ricardo Gracia Madrdejós  |   |   |




ANEXO 8: CÁLCULO ENERGÉTICO PARA LA HIBRIDACIÓN DE COMBUSTIBLES (PARTE 2)

| TFM                 |  | SENSOR DE MEDICIÓN DE CO  |                            |
|---------------------|--|---|----------------------------|
| página              | 1.4  | APROXIMACIÓN CÁLCULO ENERGÉTICO v.2   |                            |
| <b>Descripción</b>  |  | Hibridación de combustibles. (Cálculo para caso de estudio actual - con generador de H2 - Teniendo en cuenta la limitación del caudal del generador por electrólisis - inyectando durante todo ciclo) |                            |
|                     |  |    |                            |
| DATOS               |  | CÁLCULOS ESTEQUIOMÉTRICOS   |                            |
| GRUPO ELECTRÓGENO   |  | MASA  |                            |
| Model               | RAC3100-A  | GASOLINA  |                            |
| Power               | 7,00 CV  | C8H18 + 12,5*O2 + N2 -> 8*CO2 + 9*H2O + N2  |                            |
| Rated speed         | 3000,00 rpm                                      | <b>AFR (°)</b>  | <b>15,115 kgAIR:kgComb</b> |
| Volume              | 208,00 cm^3                                      | HIDRÓGENO   |                            |
| Caudal H2           | 95,00 l/h  | 2*H2 + O2 -> 2*H2O  |                            |
|                     | 26,39 cm^3/s                                     | Fuel molar mass   | 4,032 grams/mol            |
| Tiempo iny. H2      | 0,04 sec   | Oxigen molar mass   | 31,980 grams/mol           |
| Rendimiento motor   | 30,00 %  | Air mass (°)  | 152,286 grams/mol          |
|                     |  | <b>AFR (°)</b>  | <b>37,769 kgAIR:kgComb</b> |
| COMBUSTIBLE         |  | ENERGÍA   |                            |
| GASOLINA            |  | HÍBRIDO   |                            |
| Density@20°C        | 730,000 kg/m^3                                   | Volume (1kg AIR)  | 830495,806 cm^3            |
| PCI                 | 43950,000 kJ/kg                                  | Volume (1kg C8H18)  | 1369,863 cm^3              |
| PCS                 | 46885,000 kJ/kg                                  | Volume (15,115kg AIR-C8H18)   | 12553016,958 cm^3          |
| Formula             | C8H18 -  | Volume (1kg H2)   | 11123470,523 cm^3          |
| H atomic weight     | 1,008 amu  | Volume (37,769kg AIR-H2)  | 31367223,965 cm^3          |
| C atomic weight     | 12,011 amu                                       | In-cyl. AIR   | 99,4817 %                  |
| O atomic weight     | 15,990 amu                                       | In-cyl. C8H18   | 0,0109 %                   |
| HIDRÓGENO           |  | In-cyl. H2  | 0,3304 %                   |
| Density@20°C        | 0,0899 kg/m^3                                    | In-cyl. O2 (°)  | 0,1770 %                   |
| PCI                 | 120011,000 kJ/kg                                 | In-cyl. AIR Volume  | 206,9219 cm^3              |
| PCS                 | 141853,000 kJ/kg                                 | In-cyl. C8H18 Volume  | 0,0226 cm^3                |
| Formula             | H2 -   | In-cyl. H2 Volume   | 0,6873 cm^3                |
| H atomic weight     | 1,008 amu  | In-cyl. O2 Volume   | 0,3682 cm^3                |
| O atomic weight     | 15,990 amu                                       | <b>C8H18 Energy</b>   | <b>0,7245 kJ</b>           |
| OXIGENO (en aire)   |  | <b>H2 Energy</b>  | <b>0,0074 kJ</b>           |
| O2 on air           | 21,00 %  | <b>TOTAL Energy</b>   | <b>0,7319 kJ</b>           |
| Air Density@20°C    | 1,2041 kg/m^3                                    | <b>TOTAL Power</b>  | <b>7,4630 CV</b>           |
| Formula             | O2 -   | Composición del H2 obtenido por electrólisis  |                            |
| O atomic weight     | 15,990 amu                                       | Masa molecular H2   | 4,032 gramos/mol           |
| O2 Density@20°C     | 1,331 kg/m^3                                     | Masa molecular O2   | 31,980 gramos/mol          |
| NITRÓGENO (en aire) |  | Volumen H2  | 7,446E-20 cm^3             |
| N2 on air           | 79,00 %  | Volumen O2  | 3,989E-20 cm^3             |
| Air Density@20°C    | 1,2041 kg/m^3                                    | <b>% en volumen H2</b>  | <b>65,116 %</b>            |
| Formula             | N2 -   | <b>% en masa H2</b>   | <b>11,196 %</b>            |
| N atomic weight     | 14,007 amu                                       |   |                            |
| Universidad         | Universidad Politécnica de Cataluña - ETSEIB     |   |                            |
| Autores             | Oriol Fosalba Vidal y Ricardo Gracia Madrideojos |   |                            |


ANEXO 9: CÁLCULO DE LAS EMISIONES POR LA COMBUSTIÓN DE AMBOS COMBUSTIBLES

| TFM                           |   | SENSOR DE MEDICIÓN DE CO   |   |
|-------------------------------|---|--|---|
| página                        | 2   | APROXIMACIÓN CÁLCULO DE EMISIONES v.1  |   |
| Descripción                   | Cálculo de las emisiones contaminantes teóricas generadas por ciclo debido a la combustión ideal de ambos combustibles (por separado) |  |  |
| <b>DATOS</b>                  |   | <b>CÁLCULO EMISIONES</b>   |   |
| GRUPO ELECTRÓGENO             |   | MASA ADMISIÓN  |   |
| Model                         | RAC3100-A   | GASOLINA   |   |
| Power                         | 7,00 CV   | $C_8H_{18} + 12,5 \cdot O_2 + 47 \cdot N_2 \rightarrow 8 \cdot CO_2 + 9 \cdot H_2O + 47 \cdot N_2$ |   |
| Rated speed                   | 3000,00 rpm   | Fuel molar mass  | 114,232 grams/mol   |
| Volume                        | 208,00 cm <sup>3</sup>  | <b>AFR (²)</b>   | <b>15,115 kgAIR:kgComb</b>  |
| Rendimiento motor             | 30,00 %   | HIDRÓGENO  |   |
| COMBUSTIBLE                   |   | $2 \cdot H_2 + O_2 \rightarrow 2 \cdot H_2O$   |   |
| GASOLINA                      |   | Fuel molar mass  | 4,032 grams/mol   |
| Density@20°C                  | 730,000 kg/m <sup>3</sup>   | Oxigen molar mass  | 31,980 grams/mol  |
| PCI                           | 43950,000 kJ/kg   | Air mass (¹)   | 137,364 grams/mol   |
| PCS                           | 46885,000 kJ/kg   | <b>AFR (²)</b>   | <b>34,068 kgAIR:kgComb</b>  |
| Formula                       | C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> -  | MASA EMISIONES   |   |
| H atomic weight               | 1,008 amu   | GASOLINA   |   |
| C atomic weight               | 12,011 amu  | CO <sub>2</sub> molar mass   | 43,991 grams/mol  |
| O atomic weight               | 15,990 amu  | H <sub>2</sub> O molar mass  | 18,006 grams/mol  |
| HIDRÓGENO                     |   | <b>CO<sub>2</sub> EFR</b>  | <b>3,081 kgCO<sub>2</sub>:kgComb</b>  |
| Density@20°C                  | 0,0899 kg/m <sup>3</sup>  | <b>H<sub>2</sub>O EFR</b>  | <b>1,419 kgH<sub>2</sub>O:kgComb</b>  |
| PCI                           | 120011,000 kJ/kg  | In-cyl. C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> Volume  | 0,0227 cm <sup>3</sup>  |
| PCS                           | 141853,000 kJ/kg  | In-cyl. C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> Mass  | 0,0166 grams  |
| Formula                       | H <sub>2</sub> -  | CO <sub>2</sub> emissions  | 0,051043 grams/cicle  |
| H atomic weight               | 1,008 amu   | H <sub>2</sub> O emissions   | 0,023504 grams/cicle  |
| O atomic weight               | 15,990 amu  | <b>TOTAL CO<sub>2</sub> emissions</b>  | <b>1,276068 grams/sec</b>   |
| OXIGENO (en aire)             |   | <b>TOTAL H<sub>2</sub>O emissions</b>  | <b>0,587597 grams/sec</b>   |
| O <sub>2</sub> on air         | 21,00 %   | HIDRÓGENO  |   |
| Air Density@20°C              | 1,2041 kg/m <sup>3</sup>  | H <sub>2</sub> O molar mass  | 18,006 grams/mol  |
| Formula                       | O <sub>2</sub> -  | <b>H<sub>2</sub>O EFR</b>  | <b>4,466 kgH<sub>2</sub>O:kgComb</b>  |
| O atomic weight               | 15,990 amu  | In-cyl. H <sub>2</sub> Volume  | 58,6974 cm <sup>3</sup>   |
| NITRÓGENO (en aire)           |   | In-cyl. H <sub>2</sub> Mass  | 0,0053 grams  |
| N <sub>2</sub> on air         | 79,00 %   | H <sub>2</sub> O emissions   | 0,023565 grams/cicle  |
| Air Density@20°C              | 1,2041 kg/m <sup>3</sup>  | <b>TOTAL H<sub>2</sub>O emissions</b>  | <b>0,589135 grams/sec</b>   |
| Formula                       | N <sub>2</sub> -  |  |   |
| N atomic weight               | 14,007 amu  |  |   |
| EMISIONES                     |   |  |   |
| CO <sub>2</sub> Density@20°C  | 1,8420 kg/m <sup>3</sup>  |  |   |
| CO Density@20°C               | 1,1650 kg/m <sup>3</sup>  |  |   |
| H <sub>2</sub> O Density@20°C | 998,2000 kg/m <sup>3</sup>  |  |   |
| NO <sub>2</sub> Density@20°C  | 3,3900 kg/m <sup>3</sup>  |  |   |
| NO Density@20°C               | 1,2490 kg/m <sup>3</sup>  |  |   |
| Universidad                   | Universidad Politécnica de Cataluña - ETSEIB  |  |   |
| Autores                       | Oriol Fosalba Vidal y Ricardo Gracia Madrideojos  |  |   |


ANEXO 10: CÁLCULO DE LAS EMISIONES POR LA COMBUSTIÓN HÍBRIDA IDEAL (PARTE 1)

| TFM                           |  | SENSOR DE MEDICIÓN DE CO   |   |
|-------------------------------|--|--|---|
| página                        | 2.1  | APROXIMACIÓN CÁLCULO DE EMISIONES v.1                                |   |
| Descripción                   | Cálculo de las emisiones contaminantes teóricas generadas por ciclo debido a la combustión ideal de ambos combustibles (Hibridados - inyección de H2 durante el ciclo de admisión) |  |  |
| <b>DATOS</b>                  |  | <b>CÁLCULO EMISIONES</b>   |   |
| <b>GRUPO ELECTRÓGENO</b>      |  | <b>MASA ADMISIÓN</b>   |   |
| Model                         | RAC3100-A  | <b>GASOLINA</b>  |   |
| Power                         | 7,00 CV  | $C_8H_{18} + 12,5*O_2 + 47*N_2 \rightarrow 8*CO_2 + 9*H_2O + 47*N_2$ |   |
| Rated speed                   | 3000,00 rpm  | Fuel molar mass  | 114,232 grams/mol   |
| Volume                        | 208,00 cm <sup>3</sup>   | <b>AFR (°)</b>   | <b>15,115 kgAIR:kgComb</b>  |
| Rendimiento motor             | 30,00 %  | <b>HIDRÓGENO</b>   |   |
| <b>COMBUSTIBLE</b>            |  | $2*H_2 + O_2 \rightarrow 2*H_2O$                                     |   |
| <b>GASOLINA</b>               |  | Fuel molar mass  | 4,032 grams/mol   |
| Density@20°C                  | 730,000 kg/m <sup>3</sup>  | Oxigen molar mass  | 31,980 grams/mol  |
| PCI                           | 43950,000 kJ/kg  | Air mass (°)   | 152,286 grams/mol   |
| PCS                           | 46885,000 kJ/kg  | <b>AFR (°)</b>   | <b>37,769 kgAIR:kgComb</b>  |
| Formula                       | C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> -   | <b>MASA EMISIONES</b>  |   |
| H atomic weight               | 1,008 amu  | <b>GASOLINA</b>  |   |
| C atomic weight               | 12,011 amu   | CO <sub>2</sub> molar mass   | 43,991 grams/mol  |
| O atomic weight               | 15,990 amu   | H <sub>2</sub> O molar mass  | 18,006 grams/mol  |
| <b>HIDRÓGENO</b>              |  | <b>CO<sub>2</sub> EFR</b>  | <b>3,081 kgCO<sub>2</sub>:kgComb</b>  |
| Density@20°C                  | 0,0899 kg/m <sup>3</sup>   | <b>H<sub>2</sub>O EFR</b>  | <b>1,419 kgH<sub>2</sub>O:kgComb</b>  |
| PCI                           | 120011,000 kJ/kg   | In-cyl. C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> Volume                        | 0,0227 cm <sup>3</sup>  |
| PCS                           | 141853,000 kJ/kg   | In-cyl. C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> Mass                          | 0,0165 grams  |
| Formula                       | H <sub>2</sub> -   | CO <sub>2</sub> emissions  | 0,050978 grams/cicle  |
| H atomic weight               | 1,008 amu  | H <sub>2</sub> O emissions   | 0,023474 grams/cicle  |
| O atomic weight               | 15,990 amu   | <b>HIDRÓGENO</b>   |   |
| <b>OXIGENO (en aire)</b>      |  | H <sub>2</sub> O molar mass  | 18,006 grams/mol  |
| O <sub>2</sub> on air         | 21,00 %  | <b>H<sub>2</sub>O EFR</b>  | <b>4,466 kgH<sub>2</sub>O:kgComb</b>  |
| Air Density@20°C              | 1,2041 kg/m <sup>3</sup>   | In-cyl. H <sub>2</sub> Volume  | 0,1718 cm <sup>3</sup>  |
| Formula                       | O <sub>2</sub> -   | In-cyl. H <sub>2</sub> Mass  | 0,000015 grams  |
| O atomic weight               | 15,990 amu   | H <sub>2</sub> O emissions   | 0,000069 grams/cicle  |
| <b>NITRÓGENO (en aire)</b>    |  | <b>HÍBRIDO</b>   |   |
| N <sub>2</sub> on air         | 79,00 %  | TOTAL CO <sub>2</sub> emissions                                      | 0,050978 grams/cicle  |
| Air Density@20°C              | 1,2041 kg/m <sup>3</sup>   | TOTAL H <sub>2</sub> O emissions                                     | 0,023543 grams/cicle  |
| Formula                       | N <sub>2</sub> -   | <b>TOTAL CO<sub>2</sub> emissions</b>                                | <b>1,274449 grams/sec</b>   |
| N atomic weight               | 14,007 amu   | <b>TOTAL H<sub>2</sub>O emissions</b>                                | <b>0,588577 grams/sec</b>   |
| <b>EMISIONES</b>              |  |  |   |
| CO <sub>2</sub> Density@20°C  | 1,8420 kg/m <sup>3</sup>   |  |   |
| CO Density@20°C               | 1,1650 kg/m <sup>3</sup>   |  |   |
| H <sub>2</sub> O Density@20°C | 998,2000 kg/m <sup>3</sup>   |  |   |
| NO <sub>2</sub> Density@20°C  | 3,3900 kg/m <sup>3</sup>   |  |   |
| NO Density@20°C               | 1,2490 kg/m <sup>3</sup>   |  |   |
| Universidad                   | Universidad Politécnica de Cataluña - ETSEIB   |  |   |
| Autores                       | Oriol Fosalba Vidal y Ricardo Gracia Madrideojos   |  |   |


ANEXO 11: CÁLCULO DE LAS EMISIONES POR LA COMBUSTIÓN HÍBRIDA IDEAL (PARTE 2)

| TFM                        |   | SENSOR DE MEDICIÓN DE CO                         |   |
|----------------------------|---|--|---|
| página                     | 2.2   | APROXIMACIÓN CÁLCULO DE EMISIONES v.1            |   |
| Descripción                | Cálculo de las emisiones contaminantes teóricas generadas por ciclo debido a la combustión ideal de ambos combustibles (Hibridados - inyección de H2 durante todo el ciclo) |  |  |
| <b>DATOS</b>               |   | <b>CÁLCULO EMISIONES</b>                         |   |
| <b>GRUPO ELECTRÓGENO</b>   |   | <b>MASA ADMISIÓN</b>                             |   |
| Model                      | RAC3100-A   | <b>GASOLINA</b>                                  |   |
| Power                      | 7,00 CV   | C8H18 + 12,5*O2 + 47*N2 -> 8*CO2 + 9*H2O + 47*N2 |   |
| Rated speed                | 3000,00 rpm   | Fuel molar mass                                  | 114,232 grams/mol   |
| Volume                     | 208,00 cm^3   | <b>AFR (°)</b>                                   | <b>15,115 kgAIR:kgComb</b>  |
| Rendimiento motor          | 30,00 %   | <b>HIDRÓGENO</b>                                 |   |
| <b>COMBUSTIBLE</b>         |   | 2*H2 + O2 -> 2*H2O                               |   |
| <b>GASOLINA</b>            |   | Fuel molar mass                                  | 4,032 grams/mol   |
| Density@20°C               | 730,000 kg/m^3  | Oxigen molar mass                                | 31,980 grams/mol  |
| PCI                        | 43950,000 kJ/kg   | Air mass (°)                                     | 152,286 grams/mol   |
| PCS                        | 46885,000 kJ/kg   | <b>AFR (°)</b>                                   | <b>37,769 kgAIR:kgComb</b>  |
| Formula                    | C8H18 -   | <b>MASA EMISIONES</b>                            |   |
| H atomic weight            | 1,008 amu   | <b>GASOLINA</b>                                  |   |
| C atomic weight            | 12,011 amu  | CO2 molar mass                                   | 43,991 grams/mol  |
| O atomic weight            | 15,990 amu  | H2O molar mass                                   | 18,006 grams/mol  |
| <b>HIDRÓGENO</b>           |   | <b>CO2 EFR</b>                                   | <b>3,081 kgCO2:kgComb</b>   |
| Density@20°C               | 0,0899 kg/m^3   | <b>H2O EFR</b>                                   | <b>1,419 kgH2O:kgComb</b>   |
| PCI                        | 120011,000 kJ/kg  | In-cyl. C8H18 Volume                             | 0,0226 cm^3   |
| PCS                        | 141853,000 kJ/kg  | In-cyl. C8H18 Mass                               | 0,0165 grams  |
| Formula                    | H2 -  | CO2 emissions                                    | 0,050784 grams/cicle  |
| H atomic weight            | 1,008 amu   | H2O emissions                                    | 0,023385 grams/cicle  |
| O atomic weight            | 15,990 amu  | <b>HIDRÓGENO</b>                                 |   |
| <b>OXIGENO (en aire)</b>   |   | H2O molar mass                                   | 18,006 grams/mol  |
| O2 on air                  | 21,00 %   | <b>H2O EFR</b>                                   | <b>4,466 kgH2O:kgComb</b>   |
| Air Density@20°C           | 1,2041 kg/m^3   | In-cyl. H2 Volume                                | 0,6873 cm^3   |
| Formula                    | O2 -  | In-cyl. H2 Mass                                  | 0,0001 grams  |
| O atomic weight            | 15,990 amu  | H2O emissions                                    | 0,000276 grams/cicle  |
| <b>NITRÓGENO (en aire)</b> |   | <b>HÍBRIDO</b>                                   |   |
| N2 on air                  | 79,00 %   | TOTAL CO2 emissions                              | 0,050784 grams/cicle  |
| Air Density@20°C           | 1,2041 kg/m^3   | TOTAL H2O emissions                              | 0,023661 grams/cicle  |
| Formula                    | N2 -  | <b>TOTAL CO2 emissions</b>                       | <b>1,269592 grams/sec</b>   |
| N atomic weight            | 14,007 amu  | <b>TOTAL H2O emissions</b>                       | <b>0,591514 grams/sec</b>   |
| <b>EMISIONES</b>           |   |  |   |
| CO2 Density@20°C           | 1,8420 kg/m^3   |  |   |
| CO Density@20°C            | 1,1650 kg/m^3   |  |   |
| H2O Density@20°C           | 998,2000 kg/m^3   |  |   |
| NO2 Density@20°C           | 3,3900 kg/m^3   |  |   |
| NO Density@20°C            | 1,2490 kg/m^3   |  |   |
| Universidad                | Universidad Politécnica de Cataluña - ETSEIB  |  |   |
| Autores                    | Oriol Fosalba Vidal y Ricardo Gracia Madrifejos   |  |   |


ANEXO 12: CÁLCULO DE LAS EMISIONES POR LA COMBUSTIÓN “REAL” DE LA GASOLINA

| TFM                        |  | SENSOR DE MEDICIÓN DE CO  |   |
|----------------------------|--|---|---|
| página                     | 3.1  | APROXIMACIÓN CÁLCULO DE EMISIONES v.2                                 |   |
| <b>Descripción</b>         | <i>Cálculo de las emisiones contaminantes teóricas generadas por ciclo debido a la combustión de la gasolina (combustión real - en un motor sin catalizador - sin inyección de H2)</i> |   |  |
| <b>DATOS</b>               |  | <b>CÁLCULO EMISIONES</b>  |   |
| <i>GRUPO ELECTRÓGENO</i>   |  | <i>MASA ADMISIÓN</i>  |   |
| Model                      |  | GASOLINA  |   |
| Power                      | 7,00 CV  | $C_8H_{18} + (12,5-(X/2))*O_2 \rightarrow (8-X)*CO_2 + X*CO + 9*H_2O$ |   |
| Rated speed                | 3000,00 rpm  | Fuel molar mass   | 114,232 grams/mol   |
| Volume                     | 208,00 cm <sup>3</sup>   | <b>AFR (°)</b>  | <b>15,115 kgAIR:kgComb</b>  |
| Rendimiento motor          | 30,00 %  | <i>HIDRÓGENO</i>  |   |
| <i>COMBUSTIBLE</i>         |  | $2*H_2 + O_2 \rightarrow 2*H_2O$                                      |   |
| GASOLINA                   |  | Fuel molar mass   | 4,032 grams/mol   |
| Density@20°C               | 730,000 kg/m <sup>3</sup>  | Oxigen molar mass   | 31,980 grams/mol  |
| PCI                        | 43950,000 kJ/kg  | Air mass (°)  | 152,286 grams/mol   |
| PCS                        | 46885,000 kJ/kg  | <b>AFR (°)</b>  | <b>37,769 kgAIR:kgComb</b>  |
| Formula                    | C8H18 -  | <b>EMISIONES REALES</b>   |   |
| H atomic weight            | 1,008 amu  | CO2 Concentration   | 2,0190 kg/lComb   |
| C atomic weight            | 12,011 amu   | H2O Concentration   | 0,9900 kg/lComb   |
| O atomic weight            | 15,990 amu   | O2 Concentration  | 0,1300 kg/lComb   |
| <i>HIDRÓGENO</i>           |  | N2 Concentration  | 8,5680 kg/lComb   |
| Density@20°C               | 0,0899 kg/m <sup>3</sup>   | H2 Concentration  | 0,0420 kg/lComb   |
| PCI                        | 120011,000 kJ/kg   | CO Concentration  | 0,1670 kg/lComb   |
| PCS                        | 141853,000 kJ/kg   | HC Concentration  | 0,0150 kg/lComb   |
| Formula                    | H2 -   | NOx Concentration   | 0,0130 kg/lComb   |
| H atomic weight            | 1,008 amu  | SO2 Concentration   | 0,0002 kg/lComb   |
| O atomic weight            | 15,990 amu   | <a href="#">Fuente de los datos de concentración</a>                  |   |
| <i>OXIGENO (en aire)</i>   |  | <i>MASA EMISIONES</i>   |   |
| O2 on air                  | 21,00 %  | GASOLINA  |   |
| Air Density@20°C           | 1,2041 kg/m <sup>3</sup>   | In-cyl. C8H18 Volume  | 0,02270 cm <sup>3</sup>   |
| Formula                    | O2 -   | In-cyl. C8H18 Mass  | 0,0166 grams  |
| O atomic weight            | 15,990 amu   | CO2 Emissions   | 1,145569 grams/sec  |
| <i>NITRÓGENO (en aire)</i> |  | H2O Emissions   | 0,561720 grams/sec  |
| N2 on air                  | 79,00 %  | O2 Emissions  | 0,073761 grams/sec  |
| Air Density@20°C           | 1,2041 kg/m <sup>3</sup>   | N2 Emissions  | 4,861434 grams/sec  |
| Formula                    | N2 -   | H2 Emissions  | 0,023831 grams/sec  |
| N atomic weight            | 14,007 amu   | <b>CO Emissions</b>   | <b>0,094755 grams/sec</b>   |
|                            |  | HC Emissions  | 0,008511 grams/sec  |
|                            |  | NOx(°) Emissions  | 0,007376 grams/sec  |
|                            |  | SO2 Emissions   | 0,000136 grams/sec  |
|                            |  | <b>CO Emissions</b>   | <b>94,754850 mgrams/sec</b>   |
| Universidad                | Universidad Politécnica de Cataluña - ETSEIB   |   |   |
| Autores                    | Oriol Fosalba Vidal y Ricardo Gracia Madrideojos   |   |   |


ANEXO 13: CÁLCULO DE LAS EMISIONES POR LA COMBUSTIÓN HÍBRIDA “REALES” (P. 1)

| TFM                        |  | SENSOR DE MEDICIÓN DE CO  |   |                     |
|----------------------------|--|---|---|---------------------|
| página                     | 3.3  | APROXIMACIÓN CÁLCULO DE EMISIONES v.2                                 |   |                     |
| <b>Descripción</b>         | Cálculo de las emisiones contaminantes teóricas generadas por ciclo debido a la combustión de la gasolina (combustión real - en un motor sin catalizador - inyectando H2 durante el ciclo de admisión) |   |  |                     |
| <b>DATOS</b>               |  | <b>CÁLCULO EMISIONES</b>  |   |                     |
| <i>GRUPO ELECTRÓGENO</i>   |  | <i>MASA ADMISIÓN</i>  |   |                     |
| <i>GASOLINA</i>            |  | <i>GASOLINA</i>   |   |                     |
| Model                      | RAC3100-A  | $C_8H_{18} + (12,5-(X/2))*O_2 \rightarrow (8-X)*CO_2 + X*CO + 9*H_2O$ |   |                     |
| Power                      | 7,00 CV  | Fuel molar mass   | 114,232   | grams/mol           |
| Rated speed                | 3000,00 rpm  | <b>AFR (°)</b>  | <b>15,115</b>   | <b>kgAIR:kgComb</b> |
| Volume                     | 208,00 cm <sup>3</sup>   | <i>HIDRÓGENO</i>  |   |                     |
| Rendimiento motor          | 30,00 %  | $2*H_2 + O_2 \rightarrow 2*H_2O$                                      |   |                     |
| <i>COMBUSTIBLE</i>         |  | Fuel molar mass   | 4,032   | grams/mol           |
| <i>GASOLINA</i>            |  | Oxigen molar mass   | 31,980  | grams/mol           |
| Density@20°C               | 730,000 kg/m <sup>3</sup>  | Air mass (°)  | 152,286   | grams/mol           |
| PCI                        | 43950,000 kJ/kg  | <b>AFR (°)</b>  | <b>37,769</b>   | <b>kgAIR:kgComb</b> |
| PCS                        | 46885,000 kJ/kg  | <i>EMISIONES REALES</i>   |   |                     |
| Formula                    | C8H18 -  | CO2 Concentration   | 2,0190  | kg/lComb            |
| H atomic weight            | 1,008 amu  | H2O Concentration   | 0,9900  | kg/lComb            |
| C atomic weight            | 12,011 amu   | O2 Concentration  | 0,1300  | kg/lComb            |
| O atomic weight            | 15,990 amu   | N2 Concentration  | 8,5680  | kg/lComb            |
| <i>HIDRÓGENO</i>           |  | H2 Concentration  | 0,0420  | kg/lComb            |
| Density@20°C               | 0,0899 kg/m <sup>3</sup>   | CO Concentration  | 0,1670  | kg/lComb            |
| PCI                        | 120011,000 kJ/kg   | HC Concentration  | 0,0150  | kg/lComb            |
| PCS                        | 141853,000 kJ/kg   | NOx Concentration   | 0,0130  | kg/lComb            |
| Formula                    | H2 -   | SO2 Concentration   | 0,0002  | kg/lComb            |
| H atomic weight            | 1,008 amu  | <a href="#">Fuente de los datos de concentración</a>                  |   |                     |
| O atomic weight            | 15,990 amu   | <i>MASA EMISIONES</i>   |   |                     |
| <i>OXIGENO (en aire)</i>   |  | <i>GASOLINA</i>   |   |                     |
| O2 on air                  | 21,00 %  | In-cyl. C8H18 Volume  | 0,02267   | cm <sup>3</sup>     |
| Air Density@20°C           | 1,2041 kg/m <sup>3</sup>   | In-cyl. C8H18 Mass  | 0,0165  | grams               |
| Formula                    | O2 -   | CO2 Emissions   | 1,144116  | grams/sec           |
| O atomic weight            | 15,990 amu   | H2O Emissions   | 0,561008  | grams/sec           |
| <i>NITRÓGENO (en aire)</i> |  | O2 Emissions  | 0,073668  | grams/sec           |
| N2 on air                  | 79,00 %  | N2 Emissions  | 4,855267  | grams/sec           |
| Air Density@20°C           | 1,2041 kg/m <sup>3</sup>   | H2 Emissions  | 0,023800  | grams/sec           |
| Formula                    | N2 -   | <b>CO Emissions</b>   | <b>0,094635</b>   | <b>grams/sec</b>    |
| N atomic weight            | 14,007 amu   | HC Emissions  | 0,008500  | grams/sec           |
|                            |  | NOx <sup>(4)</sup> Emissions  | 0,007367  | grams/sec           |
|                            |  | SO2 Emissions   | 0,000136  | grams/sec           |
|                            |  | <b>CO Emissions</b>   | <b>94,634635</b>  | <b>mgrams/sec</b>   |
| Universidad                | Universidad Politécnica de Cataluña - ETSEIB   |   |   |                     |
| Autores                    | Oriol Fosalba Vidal y Ricardo Gracia Madrdejós   |   |   |                     |


ANEXO 14: CÁLCULO DE LAS EMISIONES POR LA COMBUSTIÓN HÍBRIDA “REALES” (P. 2)

| TFM                 |   | SENSOR DE MEDICIÓN DE CO                             |   |
|---------------------|---|--|---|
| página              | 3.5   | APROXIMACIÓN CÁLCULO DE EMISIONES v.2                |   |
| Descripción         | Cálculo de las emisiones contaminantes teóricas generadas por ciclo debido a la combustión de la gasolina (combustión real - en un motor sin catalizador - inyectando H2 durante todos los ciclos |  |  |
|                     |   |  |   |
| DATOS               |   | CÁLCULO EMISIONES                                    |   |
| GRUPO ELECTRÓGENO   |   | MASA ADMISIÓN  |   |
| Model               |   | GASOLINA   |   |
| Power               | 7,00 CV   | C8H18 + (12,5-(X/2))*O2 -> (8-X)*CO2 + X*CO + 9*H2O  |   |
| Rated speed         | 3000,00 rpm   | Fuel molar mass                                      | 114,232 grams/mol   |
| Volume              | 208,00 cm^3   | <b>AFR (²)</b>                                       | <b>15,115 kgAIR:kgComb</b>  |
| Rendimiento motor   | 30,00 %   | HIDRÓGENO  |   |
|                     |   | 2*H2 + O2 -> 2*H2O                                   |   |
| COMBUSTIBLE         |   | Fuel molar mass                                      | 4,032 grams/mol   |
| GASOLINA            |   | Oxigen molar mass                                    | 31,980 grams/mol  |
| Density@20°C        | 730,000 kg/m^3  | Air mass (¹)   | 152,286 grams/mol   |
| PCI                 | 43950,000 kJ/kg   | <b>AFR (²)</b>                                       | <b>37,769 kgAIR:kgComb</b>  |
| PCS                 | 46885,000 kJ/kg   | EMISIONES REALES                                     |   |
| Formula             | C8H18 -   | CO2 Concentration                                    | 2,0190 kg/lComb   |
| H atomic weight     | 1,008 amu   | H2O Concentration                                    | 0,9900 kg/lComb   |
| C atomic weight     | 12,011 amu  | O2 Concentration                                     | 0,1300 kg/lComb   |
| O atomic weight     | 15,990 amu  | N2 Concentration                                     | 8,5680 kg/lComb   |
| HIDRÓGENO           |   | H2 Concentration                                     | 0,0420 kg/lComb   |
| Density@20°C        | 0,0899 kg/m^3   | CO Concentration                                     | 0,1670 kg/lComb   |
| PCI                 | 120011,000 kJ/kg  | HC Concentration                                     | 0,0150 kg/lComb   |
| PCS                 | 141853,000 kJ/kg  | NOx Concentration                                    | 0,0130 kg/lComb   |
| Formula             | H2 -  | SO2 Concentration                                    | 0,0002 kg/lComb   |
| H atomic weight     | 1,008 amu   | <a href="#">Fuente de los datos de concentración</a> |   |
| O atomic weight     | 15,990 amu  | MASA EMISIONES                                       |   |
| OXIGENO (en aire)   |   | GASOLINA   |   |
| O2 on air           | 21,00 %   | In-cyl. C8H18 Volume                                 | 0,0226 cm^3   |
| Air Density@20°C    | 1,2041 kg/m^3   | In-cyl. C8H18 Mass                                   | 0,0165 grams  |
| Formula             | O2 -  | CO2 Emissions  | 1,1398 grams/sec  |
| O atomic weight     | 15,990 amu  | H2O Emissions  | 0,558870 grams/sec  |
| NITRÓGENO (en aire) |   | O2 Emissions   | 0,073387 grams/sec  |
| N2 on air           | 79,00 %   | N2 Emissions   | 4,836764 grams/sec  |
| Air Density@20°C    | 1,2041 kg/m^3   | H2 Emissions   | 0,023710 grams/sec  |
| Formula             | N2 -  | <b>CO Emissions</b>                                  | <b>0,094274 grams/sec</b>   |
| N atomic weight     | 14,007 amu  | HC Emissions   | 0,008468 grams/sec  |
|                     |   | NOx(⁴) Emissions                                     | 0,007339 grams/sec  |
|                     |   | SO2 Emissions  | 0,000135 grams/sec  |
|                     |   | <b>CO Emissions</b>                                  | <b>94,273989 mgrams/sec</b>   |
| Universidad         | Universidad Politécnica de Cataluña - ETSEIB  |  |   |
| Autores             | Oriol Fosalba Vidal y Ricardo Gracia Madrideojos  |  |   |

ANEXO 15: MODELO DE COMBUSTIÓN GASOLINA

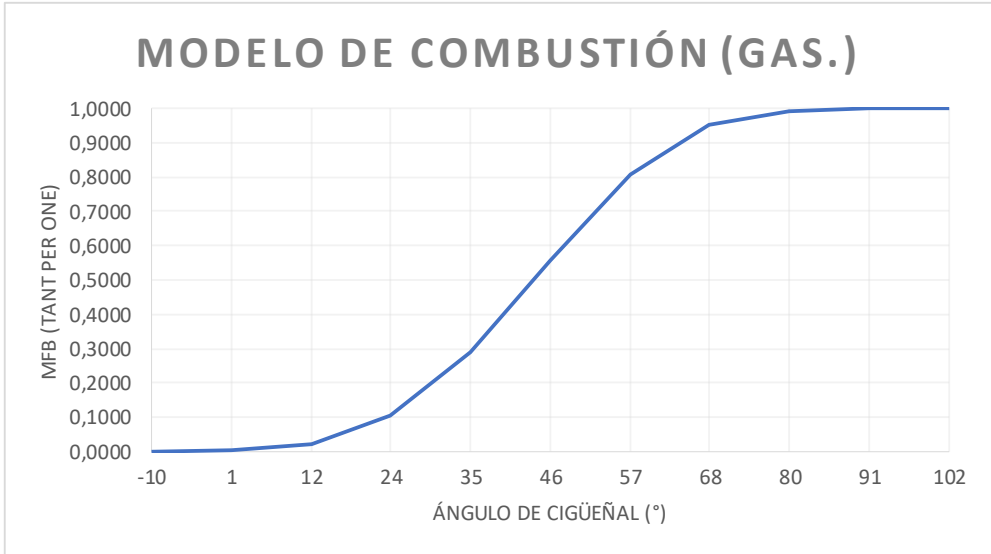
| TFM  |   | SENSOR DE MEDICIÓN DE CO |   |            |                 |
|--|---|--------------------------|---|------------|-----------------|
| página   | 4   | MODELO DE COMBUSTIÓN v.1 |   |            |                 |
| Descripción  | Desarrollo de un modelo de combustión para la combustión de C8H18 (Wiebe - sin inyección de H2) |                          |                                      |            |                 |
| $m = \frac{\ln \frac{\ln 0,1}{\ln 0,9}}{\ln \frac{\theta_{90} - \theta_0}{\theta_{10} - \theta_0}} - 1$ $x_b = \left\{ 1 - e^{\left[ -a \left( \frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta} \right)^{m+1} \right]} \right\}$ |   |                          |   |            |                 |
| DATOS  |   |                          | CÁLCULOS MODELO   |            |                 |
| Velocidad referencia   | 2500,00   | rpm                      | PARÁMETROS  |            |                 |
| Velocidad  | 3000,00   | rpm                      | C8H18   |            | ud.             |
| Bore   | 58,35   | mm                       | m   | 2,899628   | -               |
| Stroke   | 77,78   | mm                       | a   | 6,9078     | -               |
| GASOLINA   |   |                          | θo  | -10        | °               |
| alpha90  | 93,50   | °                        | MODELO  |            |                 |
| alpha10  | 40,50   | °                        | $x_b = \left\{ 1 - e^{\left[ -6,9078 \left( \frac{\theta - (-10)}{\Delta\theta} \right)^{2,899628+1} \right]} \right\}$ |            |                 |
| Dur_θ90  | 96,97   | °                        | TABLA DE RESULTADOS   |            |                 |
| Dur_θ10  | 43,97   | °                        | θ   | Δθ (C8H18) | Xb              |
| θ90  | <b>86,97</b>  |                          | -10   | 96,97      | <b>0,000000</b> |
| θ10  | <b>33,97</b>  |                          | 1   | 96,97      | <b>0,001524</b> |
| θo   | <b>-10,00</b>   | °                        | 12  | 96,97      | <b>0,022505</b> |
| a (99,9% comb.)  | 6,9078  | -                        | 24  | 96,97      | <b>0,104737</b> |
| a (90% comb.)  | 2,3026  | -                        | 35  | 96,97      | <b>0,288029</b> |
| In-cyl. C8H18 Volume   | 0,0227  | cm <sup>3</sup>          | 46  | 96,97      | <b>0,555596</b> |
|  |   |                          | 57  | 96,97      | <b>0,808188</b> |
|  |   |                          | 68  | 96,97      | <b>0,950814</b> |
|  |   |                          | 80  | 96,97      | <b>0,993719</b> |
|  |   |                          | 91  | 96,97      | <b>0,999673</b> |
|  |   |                          | 102   | 96,97      | <b>0,999994</b> |
| Universidad  | Universidad Politécnica de Cataluña - ETSEIB  |                          |   |            |                 |
| Autores  | Oriol Fosalba Vidal y Ricardo Gracia Madrdejós  |                          |   |            |                 |



| TFM  |   | SENSOR DE MEDICIÓN DE CO |   |
|--|---|--------------------------|---|
| página   | 4.1   | MODELO DE COMBUSTIÓN v.1 |   |
| Descripción  | Desarrollo de un modelo de combustión para la combustión de C8H18 (Wiebe - sin inyección de H2) |                          |  |
| $m = \frac{\ln \frac{\ln 0,1}{\ln 0,9}}{\ln \frac{\theta_{90} - \theta_0}{\theta_{10} - \theta_0}} - 1$ $x_b = \left\{ 1 - e \left[ -a \left( \frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta} \right)^{m+1} \right] \right\}$ |   |                          |   |
| DATOS  |   |                          | CÁLCULOS MODELO   |
| Velocidad referencia   | 2500,00   | rpm                      | TABLA DE RESULTADOS   |
| Velocidad  | 3000,00   | rpm                      | $\theta$  |
| GASOLINA   |   |                          | $\Delta\theta$ (C8H18)  |
| $\theta_{90}$  | 96,97   | °                        | $x_b$   |
| $\theta_{10}$  | 43,97   | °                        | -10   |
| $\theta_0$   | -10,00  | °                        | 1   |
| a (99,9% comb.)  | 6,9078  | -                        | 12  |
| a (90% comb.)  | 2,3026  | -                        | 24  |
| In-cyl. C8H18 Volume   | 0,0227  | cm <sup>3</sup>          | 35  |
|  |   |                          | 46  |
|  |   |                          | 57  |
|  |   |                          | 68  |
|  |   |                          | 80  |
|  |   |                          | 91  |
|  |   |                          | 102   |


  


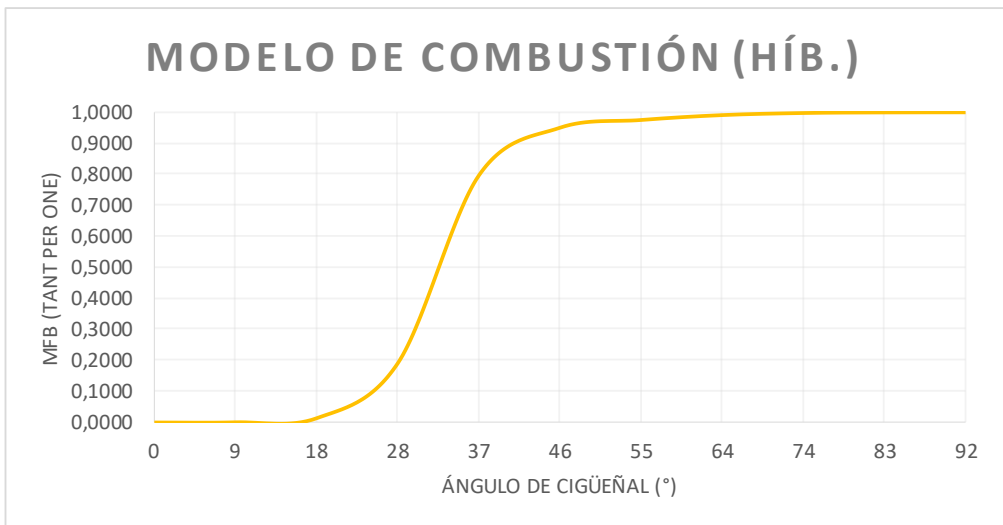
### MODELO DE COMBUSTIÓN (GAS.)




|             |  |
|-------------|--|
| Universidad | Universidad Politècnica de Catalunya - ETSEIB  |
| Autores     | Oriol Fosalba Vidal y Ricardo Gracia Madrdejós |


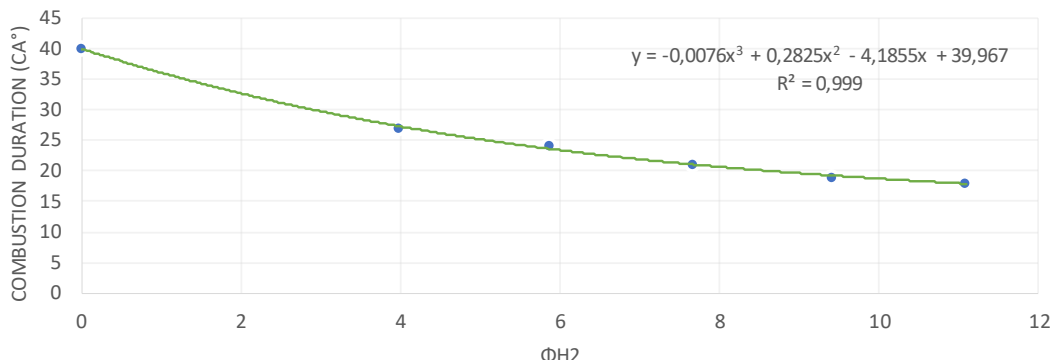
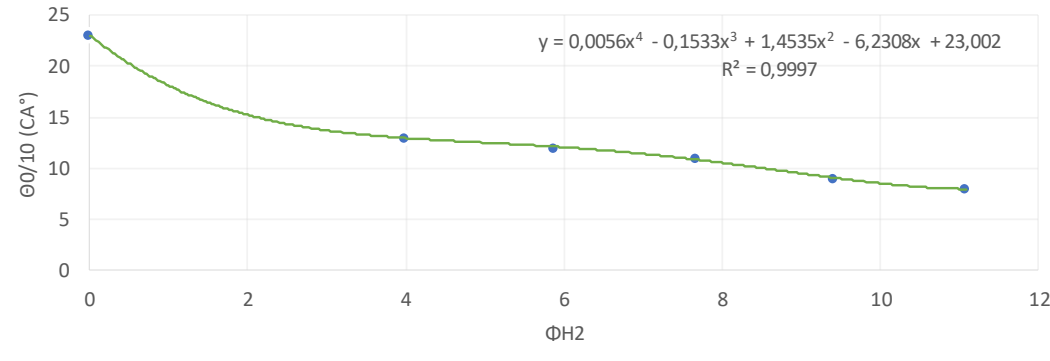
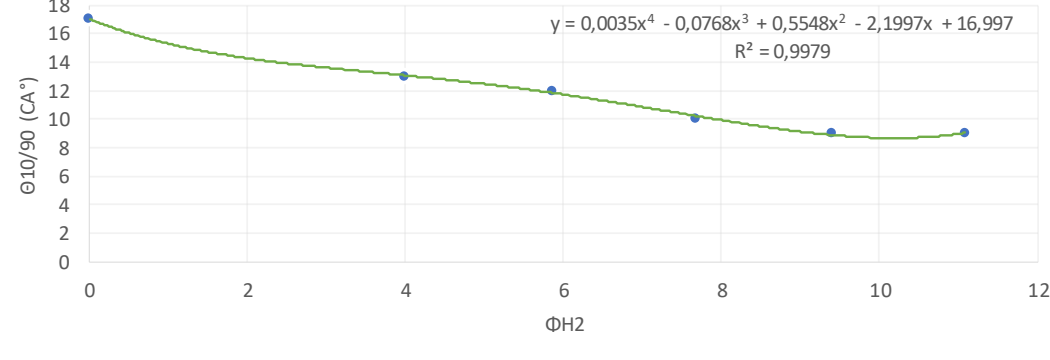
ANEXO 16: MODELO DE COMBUSTIÓN HÍBRIDO V.1


| TFM   |  | SENSOR DE MEDICIÓN DE CO |   |           |            |                 |
|---|--|--------------------------|---|-----------|------------|-----------------|
| página  | 4.2  | MODELO DE COMBUSTIÓN v.1 |   |           |            |                 |
| Descripción   | Desarrollo de un modelo de combustión para la combustión de H2 y C8H18 conjuntamente (Basado en el modelo de combustión de Wiebe - inyección de H2 durante el ciclo de admisión) |                          |    |           |            |                 |
| $m = \frac{\ln \frac{0,1}{\ln 0,9}}{\ln \frac{\theta_{90} - \theta_0}{\theta_{10} - \theta_0}} - 1$ $x_b = \lambda \left\{ 1 - e \left[ -a_1 \left( \frac{\theta - \theta_0}{\Delta \theta} \right)^{m_1 + 1} \right] \right\}_+ + (1 - \lambda) \left\{ 1 - e \left[ -a_2 \left( \frac{\theta - \theta_0}{\Delta \theta} \right)^{m_2 + 1} \right] \right\}$ |  |                          |   |           |            |                 |
| DATOS   |  |                          | CÁLCULOS MODELO   |           |            |                 |
| Velocidad referencia  | 2500,00  | rpm                      | PARÁMETROS  |           |            |                 |
| Velocidad   | 3000,00  | rpm                      |   |           |            |                 |
| GASOLINA  |  |                          | H2 (1)  | C8H18 (2) | ud.        |                 |
| alpha90   | 83,50  | °                        | m   | 6,599674  | 2,280710   | -               |
| alpha10   | 30,50  | °                        | a   | 6,9078    | 6,9078     | -               |
| θ90   | <b>86,97</b>   | °                        | θo  | 0         | 0          | °               |
| θ10   | <b>33,97</b>   | °                        | λ   | 0,8835    | -          | tant per one    |
| θo  | 0  | °                        | 1-λ   | -         | 0,1165     | tant per one    |
| a (99,9% comb.)   | 6,9078   | -                        | MODELO  |           |            |                 |
| a (90% comb.)   | 2,3026   | -                        | $x_b = 0,8835 \left\{ 1 - e \left[ -6,9078 \left( \frac{\theta - (-5)}{\Delta \theta} \right)^{6,599674 + 1} \right] \right\}_+ + 0,1165 \left\{ 1 - e \left[ -6,9078 \left( \frac{\theta - (-5)}{\Delta \theta} \right)^{2,280710 + 1} \right] \right\}$ |           |            |                 |
| In-cyl. C8H18 Volume  | 0,0227   | cm^3                     | TABLA DE RESULTADOS   |           |            |                 |
| HIDRÓGENO   |  |                          | θ   | Δθ (H2)   | Δθ (C8H18) | Xb              |
| alpha90   | 40,00  | °                        | 0   | 43,47     | 86,97      | <b>0,000000</b> |
| alpha10   | 25,50  | °                        | 9   | 43,47     | 86,97      | <b>0,000551</b> |
| θ90   | <b>43,47</b>   | °                        | 18  | 43,47     | 86,97      | <b>0,013631</b> |
| θ10   | <b>28,97</b>   | °                        | 28  | 43,47     | 86,97      | <b>0,190512</b> |
| θo  | <b>0,00</b>  | °                        | 37  | 43,47     | 86,97      | <b>0,796238</b> |
| a (99,9% comb.)   | 6,9078   | -                        | 46  | 43,47     | 86,97      | <b>0,950360</b> |
| a (90% comb.)   | 2,3026   | -                        | 55  | 43,47     | 86,97      | <b>0,975338</b> |
| In-cyl. H2 Volume   | 0,1718   | cm^3                     | 64  | 43,47     | 86,97      | <b>0,991126</b> |
|   |  |                          | 74  | 43,47     | 86,97      | <b>0,997846</b> |
|   |  |                          | 83  | 43,47     | 86,97      | <b>0,999672</b> |
|   |  |                          | 92  | 43,47     | 86,97      | <b>0,999971</b> |
| Universidad   | Universidad Politécnica de Cataluña - ETSEIB   |                          |   |           |            |                 |
| Autores   | Oriol Fosalba Vidal y Ricardo Gracia Madrideojos   |                          |   |           |            |                 |

| TFM   |  | SENSOR DE MEDICIÓN DE CO |   |
|---|--|--------------------------|---|
| página  | 4.3  | MODELO DE COMBUSTIÓN v.1 |   |
| <b>Descripción</b>  | Desarrollo de un modelo de combustión para la combustión de H2 y C8H18 conjuntamente (Basado en el modelo de combustión de Wiebe - inyección de H2 durante el ciclo de admisión) |                          |  |
| $m = \frac{\ln \frac{\ln 0,1}{\ln 0,9}}{\ln \frac{\theta_{90} - \theta_0}{\theta_{10} - \theta_0}} - 1$ $x_b = \lambda \left\{ 1 - e \left[ -a_1 \left( \frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta} \right)^{m_1 + 1} \right] \right\}_+ + (1 - \lambda) \left\{ 1 - e \left[ -a_2 \left( \frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta} \right)^{m_2 + 1} \right] \right\}$ |  |                          |   |
| DATOS   |  |                          | CÁLCULOS MODELO   |
| Velocidad referencia  | 2500,00  | rpm                      | TABLA DE RESULTADOS   |
| Velocidad   | 3000,00  | rpm                      | $\theta$  |
| GASOLINA  |  |                          | $\Delta\theta$ (H2)   |
| $\theta_{90}$   | 86,97  | °                        | $\Delta\theta$ (C8H18)  |
| $\theta_{10}$   | 33,97  | °                        | $x_b$   |
| $\theta_0$  | 0  | °                        | 0   |
| a (99,9% comb.)   | 6,9078   | -                        | 9   |
| a (90% comb.)   | 2,3026   | -                        | 18  |
| In-cyl. C8H18 Volume  | 0,02267  | cm <sup>3</sup>          | 28  |
| HIDRÓGENO   |  |                          | 37  |
| $\theta_{90}$   | 43,47  | °                        | 46  |
| $\theta_{10}$   | 28,97  | °                        | 55  |
| $\theta_0$  | 0  | °                        | 64  |
| a (99,9% comb.)   | 6,9078   | -                        | 74  |
| a (90% comb.)   | 2,3026   | -                        | 83  |
| In-cyl. H2 Volume   | 0,17183  | cm <sup>3</sup>          | 92  |
|   |  |                          |   |
| Universidad   | Universidad Politècnica de Catalunya - ETSEIB  |                          |   |
| Autores   | Oriol Fosalba Vidal y Ricardo Gracia Madrideojos   |                          |   |

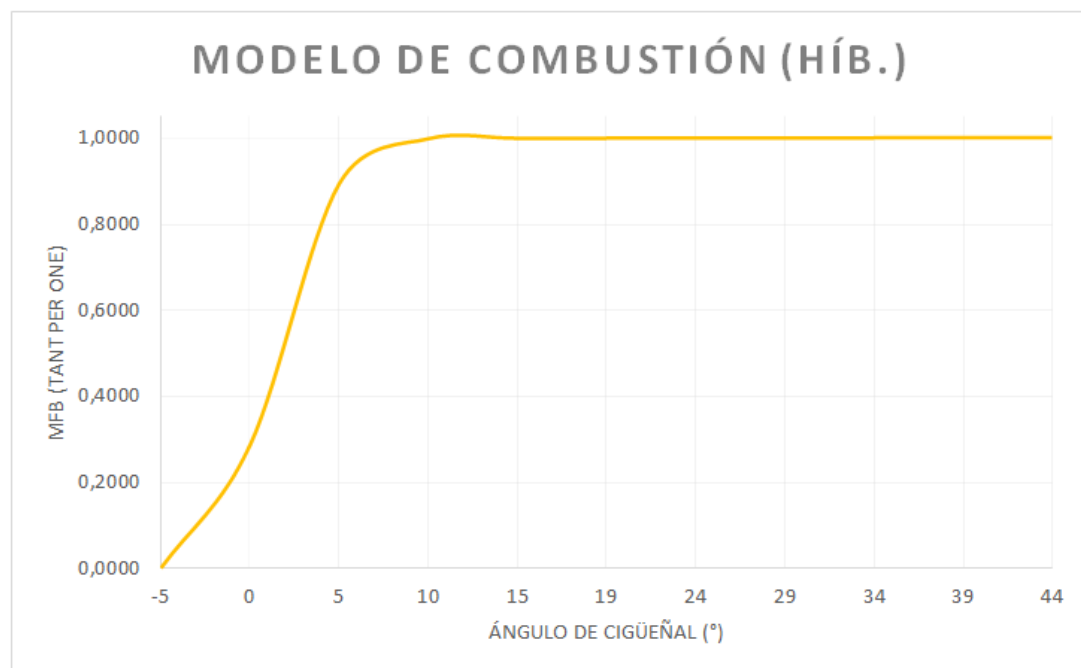
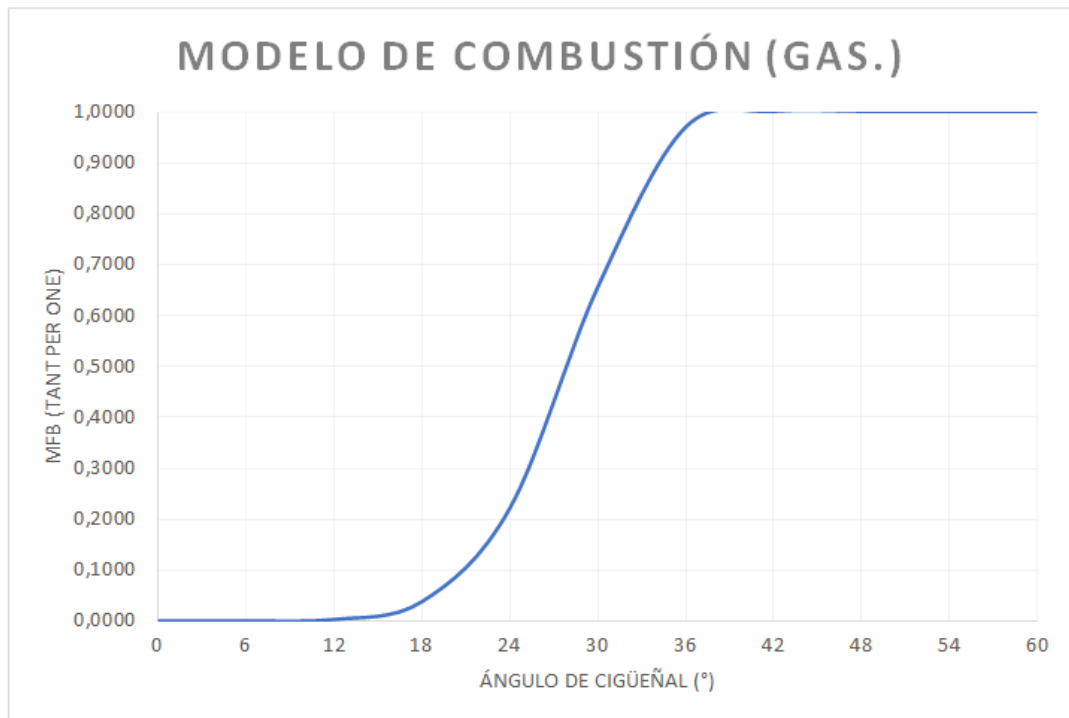
ANEXO 17: MODELO DE COMBUSTIÓN HÍBRIDO V.2

| TFM  |  | SENSOR DE MEDICIÓN DE CO  |                               |     |   |     |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
|--|--|---|-------------------------------|-----|---|-----|----------------------------|--|--|--|-----------|----|-------|-----|-----|----|--------|---|-----|---|--------|---|
| página   | 5.1  | MODELO DE COMBUSTIÓN v.2  |                               |     |   |     |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
| Descripción  |  | Definición de los ángulos de combustión para la mezcla de combustibles, según referencias |                               |     |  |     |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
| DATOS  |  |   | CÁLCULOS                      |     |   |     |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
| Velocidad referencia   | 2500,00  | rpm   | DURACIÓN DE LA COMBUSTIÓN     |     |   |     |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
| Velocidad  | 3000,00  | rpm   | φH2                           | ud. | Duration  | ud. |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
| Bore   | 58,35  | mm  | 0                             | %   | 40  | CA° |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
| Stroke   | 77,78  | mm  | 3,99                          | %   | 27  | CA° |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
| λ  | 0,4461   | -   | 5,87                          | %   | 24  | CA° |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
| GASOLINA   |  |   | 7,68                          | %   | 21  | CA° |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
| θ90  | <b>38,99</b>                                   | °   | 9,41                          | %   | 19  | CA° |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
| θ10  | <b>22,20</b>                                   | °   | 11,09                         | %   | 18  | CA° |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
| θo   | -5   | °   | ÁNGULOS DE COMBUSTIÓN DEL 10% |     |   |     |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
| a (99,9% comb.)  | 6,9078   | -   | φH2                           | ud. | θ10   | ud. |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
| a (90% comb.)  | 2,3026   | -   | 0                             | %   | 23  | CA° |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
| In-cyl. C8H18 Volume   | 0,0195   | cm <sup>3</sup>   | 3,99                          | %   | 13  | CA° |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
| HIDRÓGENO  |  |   | 5,87                          | %   | 12  | CA° |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
| θ90  | <b>9,78</b>                                    | °   | 7,68                          | %   | 11  | CA° |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
| θ10  | <b>-0,22</b>                                   | °   | 9,41                          | %   | 9   | CA° |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
| θo   | -5   | °   | 11,09                         | %   | 8   | CA° |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
| a (99,9% comb.)  | 6,9078   | -   | ÁNGULOS DE COMBUSTIÓN DEL 90% |     |   |     |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
| a (90% comb.)  | 2,3026   | -   | φH2                           | ud. | θ90   | ud. |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
| In-cyl. H2 Volume  | 18,9922  | cm <sup>3</sup>   | 0                             | %   | 17  | CA° |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
| φH2  | 0,0960   | tant per one  | 3,99                          | %   | 13  | CA° |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
|  |  |   | 5,87                          | %   | 12  | CA° |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
|  |  |   | 7,68                          | %   | 10  | CA° |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
|  |  |   | 9,41                          | %   | 9   | CA° |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
|  |  |   | 11,09                         | %   | 9   | CA° |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
| $Duration = -0,0076 * \varphi_{H2}^3 + 0,2825 * \varphi_{H2}^2 - 4,1855 * \varphi_{H2}^1 + 39,967$ $\theta_{10} = 0,0056 * \varphi_{H2}^4 - 0,1533 * \varphi_{H2}^3 + 1,4535 * \varphi_{H2}^2 - 6,2308 * \varphi_{H2}^1 + 23,002$ $\theta_{90} = \theta_{10} + 0,0035 * \varphi_{H2}^4 - 0,0768 * \varphi_{H2}^3 + 0,5548 * \varphi_{H2}^2 - 2,1997 * \varphi_{H2}^1 + 16,997$ |  |   |                               |     |   |     |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
| <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">ÁNGULOS DEL MODELO HÍBRIDO</th> </tr> <tr> <th>Parámetro</th> <th>H2</th> <th>C8H18</th> <th>ud.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>θ90</td> <td>10</td> <td>39,208</td> <td>°</td> </tr> <tr> <td>θ10</td> <td>0</td> <td>22,417</td> <td>°</td> </tr> </tbody> </table>  |  |   |                               |     |   |     | ÁNGULOS DEL MODELO HÍBRIDO |  |  |  | Parámetro | H2 | C8H18 | ud. | θ90 | 10 | 39,208 | ° | θ10 | 0 | 22,417 | ° |
| ÁNGULOS DEL MODELO HÍBRIDO   |  |   |                               |     |   |     |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
| Parámetro  | H2   | C8H18   | ud.                           |     |   |     |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
| θ90  | 10   | 39,208  | °                             |     |   |     |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
| θ10  | 0  | 22,417  | °                             |     |   |     |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
| Universidad  | Universidad Politécnica de Cataluña - ETSEIB   |   |                               |     |   |     |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |
| Autores  | Oriol Fosalba Vidal y Ricardo Gracia Madrdejós |   |                               |     |   |     |                            |  |  |  |           |    |       |     |     |    |        |   |     |   |        |   |

|   |  |   |   |
|---|--|---|---|
| <b>TFM</b>  |  | <b>SENSOR DE MEDICIÓN DE CO</b>   |   |
| <b>página</b>   | <b>5.2</b>                                     | <b>MODELO DE COMBUSTIÓN v.2</b>   |   |
| <b>Descripción</b>  |  | Definición de los ángulos de combustión para la mezcla de combustibles (según - Yaodong Du, X. Y. (2015). Research on combustion and emission characteristics of a lean burn gasoline engine with hydrogen direct-injection.) |  |
| <h3>DURATION</h3>                         |  |   |   |
| <h3>ÁNGULOS DE COMBUSTIÓN DEL 10%</h3>   |  |   |   |
| <h3>ÁNGULOS DE COMBUSTIÓN DEL 90%</h3>  |  |   |   |
| <b>Universidad</b>  | Universidad Politécnica de Cataluña - ETSEIB   |   |   |
| <b>Autores</b>  | Oriol Fosalba Vidal y Ricardo Gracia Madrdejós |   |   |

| TFM   |   | SENSOR DE MEDICIÓN DE CO |  |           |            |              |
|---|---|--------------------------|--|-----------|------------|--------------|
| página  | 5.3   | MODELO DE COMBUSTIÓN v.2 |  |           |            |              |
| <b>Descripción</b>  | Desarrollo de un modelo de combustión para la combustión de H2 y C8H18 conjuntamente (Basado en el modelo de combustión de Wiebe - inyección de H2 durante TODO el ciclo) |                          |   |           |            |              |
| $x_b = \lambda \left\{ 1 - e^{\left[ -a_1 \left( \frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta} \right)^{m_1+1} \right]} \right\}_+ + (1 - \lambda) \left\{ 1 - e^{\left[ -a_2 \left( \frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta} \right)^{m_2+1} \right]} \right\}$ $m = \frac{\ln \frac{\ln 0,1}{\ln 0,9}}{\ln \frac{\theta_{90} - \theta_0}{\theta_{10} - \theta_0}} - 1$ |   |                          |  |           |            |              |
| DATOS   |   |                          | CÁLCULOS MODELO  |           |            |              |
| Velocidad referencia  | 2500,00   | rpm                      | PARÁMETROS   |           |            |              |
| Velocidad   | 3000,00   | rpm                      | H2 (1)   | C8H18 (2) | ud.        |              |
| Bore  | 58,35   | mm                       | m  | 1,732980  | 5,415386   | -            |
| Stroke  | 77,78   | mm                       | a  | 6,9078    | 6,9078     | -            |
| GASOLINA  |   |                          | θo   | -5        | -5         | °            |
| θ90   | 38,99   | °                        | λ  | 0,9990    | -          | tant per one |
| θ10   | 22,20   | °                        | 1-λ  | -         | 0,0010     | tant per one |
| θo  | -5  | °                        | MODELO DE COMBUSTIÓN   |           |            |              |
| a (99,9% comb.)   | 6,9078  | -                        | $x_b = 0,9990 \left\{ 1 - e^{\left[ -6,9078 \left( \frac{\theta - (-5)}{\Delta\theta} \right)^{1,732980+1} \right]} \right\}_+ + 0,0010 \left\{ 1 - e^{\left[ -6,9078 \left( \frac{\theta - (-5)}{\Delta\theta} \right)^{5,4153,86+1} \right]} \right\}$ |           |            |              |
| a (90% comb.)   | 2,3026  | -                        | TABLA DE RESULTADOS  |           |            |              |
| In-cyl. C8H18 Volume  | 0,0195  | cm^3                     | θ  | Δθ (H2)   | Δθ (C8H18) | Xb           |
| HIDRÓGENO   |   |                          | -5   | 14,78     | 43,99      | 0,000000     |
| θ90   | 9,78  | °                        | 0  | 14,78     | 43,99      | 0,286303     |
| θ10   | -0,22   | °                        | 5  | 14,78     | 43,99      | 0,893174     |
| θo  | -5  | °                        | 10   | 14,78     | 43,99      | 0,997867     |
| a (99,9% comb.)   | 6,9078  | -                        | 15   | 14,78     | 43,99      | 0,999012     |
| a (90% comb.)   | 2,3026  | -                        | 19   | 14,78     | 43,99      | 0,999127     |
| In-cyl. H2 Volume   | 18,9922   | cm^3                     | 24   | 14,78     | 43,99      | 0,999390     |
|   |   |                          | 29   | 14,78     | 43,99      | 0,999746     |
|   |   |                          | 34   | 14,78     | 43,99      | 0,999962     |
|   |   |                          | 39   | 14,78     | 43,99      | 0,999999     |
|   |   |                          | 44   | 14,78     | 43,99      | 1,000000     |
| Universidad   | Universidad Politécnica de Cataluña - ETSEIB  |                          |  |           |            |              |
| Autores   | Oriol Fosalba Vidal y Ricardo Gracia Madrideojos  |                          |  |           |            |              |

|                    |                            |   |
|--------------------|----------------------------|---|
| <b>TFM</b>         |                            | <b>SENSOR DE MEDICIÓN DE CO</b>   |
| <b>página</b>      | <b>5.4</b>                 | <b>MODELO DE COMBUSTIÓN v.2</b>   |
| <b>Descripción</b> | <i>Gràfics comparatius</i> |  |



|                    |  |
|--------------------|--|
| <b>Universidad</b> | Universidad Politècnica de Catalunya - ETSEIB  |
| <b>Autores</b>     | Oriol Fosalba Vidal y Ricardo Gracia Madrdejós |