



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



# GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

## TRABAJO FIN DE GRADO

---

DISEÑO, INSTRUMENTACIÓN Y VALIDACIÓN  
EXPERIMENTAL DE UNA INSTALACIÓN PARA LA  
CARACTERIZACIÓN DEL ENSUCIAMIENTO DE  
INTERCAMBIADORES DE EGR EN UN MOTOR DIÉSEL  
DE AUTOMOCIÓN

**AUTOR:** López Barambio, Alejandro

**TUTOR:** Climent Puchades, Héctor

**COTUTOR:** Luján Martínez, José Manuel

**Curso académico:** 2017/18



## RESUMEN

Debido al gran empleo de los motores térmicos hoy en día, en especial en el sector de automoción, la normativa europea encargada de regular las emisiones de gases contaminantes por parte de los automóviles a la atmósfera, se ha visto obligada a la imposición de leyes cada vez más restrictivas con el objetivo de reducir estas emisiones.

En consecuencia, las marcas encargadas de la fabricación de estos motores se han tenido que adaptar a estas normativas mediante la instalación de sistemas dedicados plenamente a la reducción de emisiones de gases contaminantes.

Uno de estos sistemas utilizados en los motores térmicos actualmente, mediante el cual se consigue reducir las emisiones de  $\text{NO}_x$ , es un sistema conocido como *recirculación de gases de escape* (EGR), el cual se basa en la introducción de parte de los gases de escape de nuevo en los cilindros con el objetivo de reducir la temperatura local de combustión y disminuir así estas emisiones. Con este tipo de sistema, también existe un punto crítico, y es el del ensuciamiento de estos circuitos, algo que hay que tener en cuenta y es importante controlar lo máximo posible.

Un elemento de gran importancia en este sistema es el intercambiador de calor, cuya función es la de reducir la temperatura de los gases recirculados antes de introducirlos de nuevo al cilindro.

En este Trabajo Fin de Grado, se ha realizado el diseño y montaje de uno de estos sistemas de EGR en un motor térmico, instrumentando posteriormente todo ello mediante sensores de gran precisión. Haciendo especial hincapié en el intercambiador de calor, ya que se han realizado ensayos con diferentes tipos, con el fin de evaluar su comportamiento. Es por ello que la evolución del ensuciamiento de este elemento del sistema ha sido de gran importancia, teniendo muy en cuenta la presión diferencial entre la entrada y la salida del intercambiador de calor, valor significativo para la caracterización del ensuciamiento de este.



Documentos contenidos en el Trabajo Fin de Grado:

- Resumen
- Memoria
- Presupuesto
- Planos

## ÍNDICE DE LA MEMORIA

<b>1. INTRODUCCIÓN AL PROYECTO</b> .....	10
<b>1.1. INTRODUCCIÓN</b> .....	10
<b>1.2. OBJETO DEL PROYECTO</b> .....	14
<b>1.3. ANTECEDENTES</b> .....	15
<b>1.4. JUSTIFICACIÓN</b> .....	15
<b>2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA INSTALACIÓN</b> .....	16
<b>2.1. INTRODUCCIÓN</b> .....	16
<b>2.2. SITUACIÓN Y ESTRUCTURA</b> .....	17
<b>2.3. SALA DE ENSAYOS</b> .....	18
<b>2.3.1. Descripción de la sala</b> .....	18
<b>2.3.1.1. Descripción de la bancada</b> .....	19
<b>2.3.1.2. Descripción del freno dinamométrico</b> .....	20
<b>2.3.1.3. Descripción de la transmisión</b> .....	20
<b>2.3.2. Sistemas auxiliares de la sala</b> .....	21
<b>2.3.2.1. Sistema de ventilación</b> .....	21
<b>2.3.2.2. Red de agua de refrigeración</b> .....	22
<b>2.3.2.3. Red de combustible</b> .....	23
<b>2.3.2.4. Red de aire comprimido</b> .....	23
<b>2.3.2.5. Red eléctrica</b> .....	23
<b>2.3.2.6. Sistemas de seguridad</b> .....	24
<b>2.4. DESCRIPCIÓN DEL MOTOR</b> .....	25
<b>2.4.1. Descripción y características del motor R9M</b> .....	25
<b>2.4.2. Elementos auxiliares</b> .....	25
<b>2.4.2.1. Sistema de admisión de aire</b> .....	25
<b>2.4.2.2. Sistema de alimentación de combustible</b> .....	27
<b>2.4.2.3. Sistema de refrigeración</b> .....	27

2.4.2.4.	<i>Sistema de escape</i> .....	28
2.4.3.	Principales emisiones contaminantes.....	29
2.5.	INSTRUMENTACIÓN Y MEDIDA DE PARÁMETROS.....	31
2.5.1.	Medida de parámetros fundamentales.....	32
2.5.1.1.	<i>Par y régimen de giro del motor</i> .....	33
2.5.1.2.	<i>Gasto de combustible</i> .....	33
2.5.2.	Medida de parámetros específicos.....	34
2.5.2.1.	<i>Presión</i> .....	34
2.5.2.2.	<i>Temperatura</i> .....	35
2.5.2.3.	<i>Gasto de aire</i> .....	36
2.5.2.4.	<i>Emisiones de contaminantes</i> .....	37
2.6.	SISTEMA DE CONTROL Y ADQUISICIÓN DE DATOS.....	39
3.	SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE GASES DE ESCAPE.....	41
3.1.	INTRODUCCIÓN.....	41
3.2.	ADAPTACIÓN SISTEMA DE EGR E INSTRUMENTACIÓN.....	43
3.2.1.	Intercambiador de calor.....	44
3.2.2.	Válvula de EGR.....	45
3.2.3.	Circuito de agua de refrigeración.....	46
3.2.4.	Instrumentación.....	46
3.3.	ENSUCIAMIENTO DE ELEMENTOS DEL SISTEMA DE EGR.....	47
4.	ENSAYOS Y RESULTADOS.....	49
4.1.	INTRODUCCIÓN.....	49
4.2.	RUTINA DE ENSAYOS.....	49
4.3.	PUNTOS DE FUNCIONAMIENTO.....	50
4.4.	RESULTADOS OBTENIDOS.....	52
4.4.1.	Punto de alta opacidad.....	53
4.4.2.	Punto de altos HC.....	60
4.5.	INCIDENCIAS Y RESOLUCIÓN.....	67
5.	CONCLUSIONES.....	69
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	70

## ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

<b>1. PRESUPUESTO</b> .....	74
<b>1.1. INTRODUCCIÓN</b> .....	74
<b>1.2. PRESUPUESTOS</b> .....	74
<b>1.2.1. Costes de recursos humanos</b> .....	74
<b>1.2.2. Costes de materiales</b> .....	75
<b>1.2.3. Costes de equipos</b> .....	75
<b>1.2.4. Costes generales</b> .....	76
<b>1.2.5. Presupuesto global</b> .....	77



# I. MEMORIA



## 1. INTRODUCCIÓN AL PROYECTO

### 1.1. INTRODUCCIÓN

Desde la aparición de los primeros Motores de Combustión Interna Alternativos (MCIA) a finales del siglo XIX, su empleo ha sido cada vez mayor hasta la actualidad. Desde entonces, las innovaciones y mejoras de estos motores no han cesado, aumentando así sus prestaciones paulatinamente. Sin embargo, hay ciertos inconvenientes en la utilización de los MCIA, ya que su uso desmesurado ha llevado a adoptar ciertas medidas para la protección del medioambiente. Las emisiones procedentes de los escapes de estos vehículos contienen monóxido de carbono, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno que son liberados a la atmósfera en importantes cantidades; son los componentes del "smog oxidante fotoquímico", además de lo perjudiciales que son estos gases para la salud. Las restricciones impuestas en relación a las emisiones contaminantes son cada vez más severas y por lo tanto las empresas se ven obligadas a priorizar a la hora de desarrollar sus motores y a realizar una mayor inversión en lo que a técnicas de reducción de contaminantes se refiere.

El motor de combustión interna alternativo (MCIA) es la unidad básica en la que se desarrolla el transporte terrestre y marítimo actualmente. La finalidad de estos motores térmicos reside en obtener energía mecánica gracias al proceso de combustión que se da en la mezcla comprimida de aire y combustible dentro de una cámara cerrada o cilindro, con el fin de incrementar la presión y generar con suficiente potencia el movimiento lineal alternativo del pistón. Se distinguen dos tipos de motores en función de la regulación de la carga y de la forma de encendido. Así pues, tenemos el motor de encendido provocado (MEP) y el motor de encendido por compresión (MEC). En los últimos años el profundo estudio y desarrollo que han sufrido los MEC, ha acortado las diferencias con los MEP en aspectos como: disminución de ruido, aumento de potencia específica y de par. Un mejor rendimiento, menor consumo específico de este tipo de motor y, sobre todo, las menores cargas fiscales que gravan el combustible que utiliza (gasóleo) han llevado a un mayor empleo de este tipo de motores en la automoción.

	MEP	MEC
<b>Formación de la mezcla</b>	Durante la admisión	Final de la compresión
<b>Encendido de la mezcla</b>	Provocado por una chispa eléctrica	Autoinflamación del combustible
<b>Regulación de la carga</b>	Cuantitativa	Cualitativa
<b>Combustible</b>	Gasolina	Diésel
<b>Fluido operante en admisión</b>	Aire + Combustible	Aire
<b>Relación de compresión</b>	8 a 11	12 a 23
<b>Fr</b>	1.0	0.4 – 0.7
<b>Combustión</b>	Premezclada	Premezclada y muy alta difusión

*Tabla 1.1: principales diferencias entre MEP y MEC*

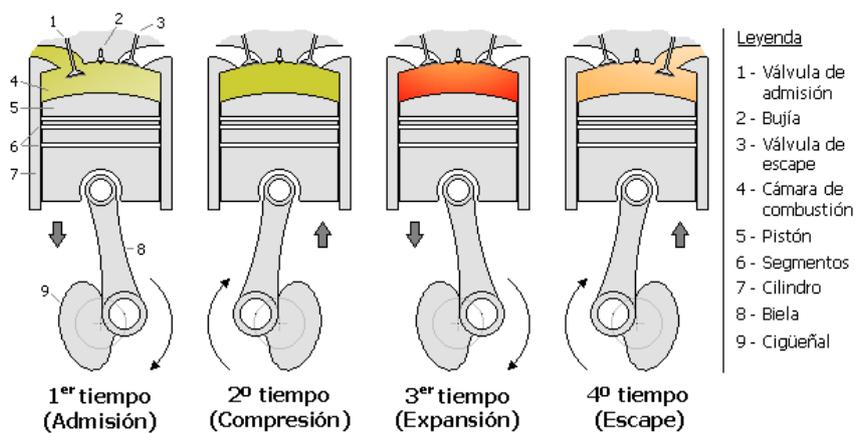
En general, un motor se puede considerar como un dispositivo que permite transformar cualquier tipo de energía en energía mecánica. Dentro de este amplio campo, se encuentra el motor térmico, que se puede definir como el dispositivo que permite obtener energía mecánica a partir de la energía térmica contenida en un fluido compresible.

Los motores de combustión interna alternativos (MCIA) se engloban dentro del grupo de motores térmicos en los que las variaciones del estado térmico se producen en el propio fluido del motor (combustible), generando un trabajo global positivo. Este trabajo es transmitido mediante el desplazamiento lineal de un émbolo (pistón) al cigüeñal, a través de la biela; es un mecanismo de tipo biela-manivela. De este modo conseguimos transformar, mediante un proceso de combustión, la energía química almacenada en el combustible y transformarla en energía mecánica en el eje del cigüeñal.

Como ya se ha hecho referencia anteriormente, los MCIA se clasifican en motores de encendido provocado (MEP) y motores de encendido por compresión (MEC). La característica principal del primero de ellos (MEP) es que el inicio de la combustión se produce mediante un aporte de energía externo al ciclo termodinámico, que en motores modernos se consigue al hacer saltar una chispa entre los dos electrodos de una bujía. En cuanto al MEC, la combustión se inicia mediante un proceso de autoencendido de la mezcla de combustible al conseguirse temperaturas suficientemente altas en la cámara de combustión debido al proceso de compresión.

Atendiendo al ciclo de trabajo de los MCIA, estos se pueden clasificar en motores de cuatro tiempos (4T) y motores de dos tiempos (2T). Las diferencias entre estos dos tipos de motores tienen que ver básicamente con el proceso de renovación de la carga, es decir, escape y admisión.

- **Motores de cuatro tiempos:** en estos motores el ciclo de trabajo se completa en dos vueltas de cigüeñal o, lo que es lo mismo, en cuatro carreras del émbolo (admisión, compresión, expansión y escape).



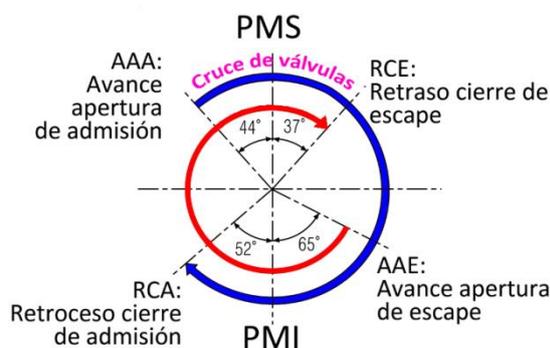
**Gráfico 2.1:** carreras de un motor de 4 tiempos

- **Fase de admisión (1ª carrera):** con las válvulas de admisión abiertas y las de escape cerradas, el émbolo se desplaza desde el punto muerto superior (PMS) hacia el punto muerto inferior (PMI). Debido a esto se crea en el interior del cilindro una pequeña depresión, suficiente como para inducir la entrada de gases a través del conducto de admisión. Estos gases serán aire o

una mezcla de aire y combustible, dependiendo del tipo de motor. Cuando el émbolo llega al PMI las válvulas de admisión se cierran y comienza la siguiente fase.

- *Fase de compresión (2ª carrera):* con las válvulas de admisión y escape cerradas el émbolo se desplaza desde el PMI hacia el PMS comprimiendo el fluido contenido en el cilindro. En las cercanías del PMS se produce el salto de chispa en el caso de un motor de encendido provocado o se inyecta el combustible en el caso de un motor de encendido por compresión, produciéndose la combustión.
- *Fase de expansión (3ª carrera):* la combustión, entre otros efectos, produce un aumento de presión de los gases contenidos en el cilindro, empujando al émbolo, que se desplaza desde el PMS hacia el PMI. Este desplazamiento es el único del que se obtiene trabajo.
- *Fase de escape (4ª carrera):* en el PMI se abre la válvula de escape y el émbolo comienza a desplazarse hacia el PMS expulsando los gases quemados hacia el exterior del cilindro. Cuando el émbolo llega al PMS se cierra la válvula de escape y se inicia un nuevo ciclo.

En realidad, debido a la compresibilidad del aire y a que la combustión no puede producirse a volumen constante, es necesario realizar modificaciones respecto a lo descrito anteriormente en los momentos de apertura y cierre de las válvulas y en el instante de inicio de combustión, de modo que no coinciden con los PMS y PMI, sino que se producen con adelantos y retrasos respecto a estos puntos. Este proceso se conoce como *cruce de válvulas*.



**Gráfico 2.2:** cruce de válvulas

- **Motores de dos tiempos:** este tipo de motores se caracteriza porque el ciclo se completa en dos carreras del émbolo o, lo que es lo mismo, en una revolución, es decir, 360 grados de giro del cigüeñal. Los procesos que tienen lugar son los mismos que en un motor de cuatro tiempos, aunque con una menor duración angular.

Una de las mayores debilidades de estos motores, en especial de los motores de encendido provocado (MEC) es la emisión de gases contaminantes, como se ha nombrado anteriormente. Por tanto, el futuro de la investigación en estos motores girará en torno a la

reducción de estas emisiones, pero a su vez intentando mantener al máximo las prestaciones. Debido a esto, es de gran importancia el conocimiento de los fenómenos físico-químicos que controlan la combustión, así como la caracterización, evolución y estudio de las emisiones en el motor.

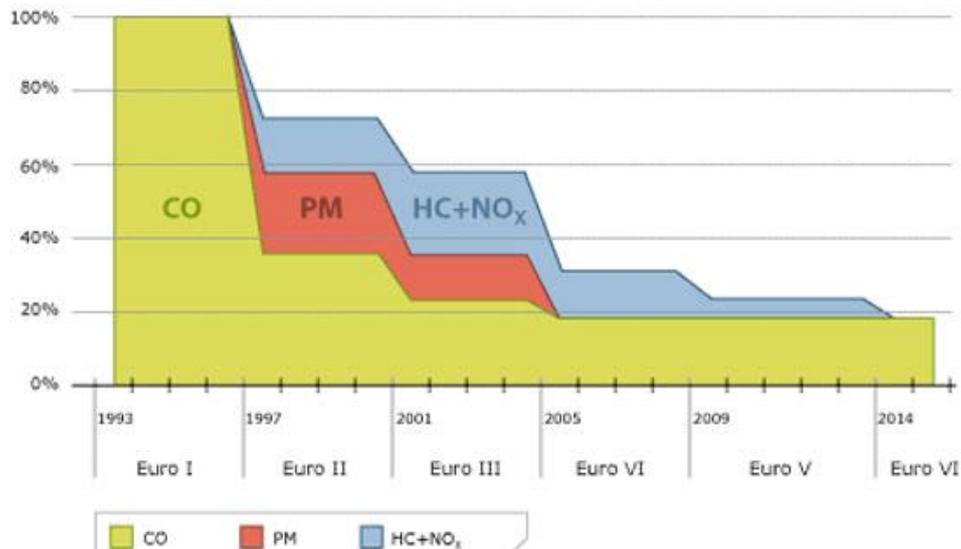
La Asociación de Constructores Europeos de Automóviles (ACEA), ha venido estos años negociando con la Comisión Europea diferentes reglamentaciones referentes a los límites permisibles de emisiones contaminantes.

La norma europea sobre emisiones es un conjunto de requisitos que regulan los límites aceptables para las emisiones de gases de combustión de los vehículos nuevos vendidos en los Estados Miembros de la Unión Europea. Las normas de emisión se definen en una serie de directivas de la Unión Europea con implantación progresiva que son cada vez más restrictivas. Estas normativas van desde la EURO1 hasta la EURO6, comprendidas entre el año 1992 hasta la actualidad, respectivamente.

En las tablas siguientes se muestran los diferentes límites de emisiones según la normativa y tipo de motor. Como se puede apreciar en ellas, se está llegando al límite técnico de reducción de monóxido de carbono y partículas, debido a que para motores diésel desde la Euro 4 y 5 respectivamente sus límites están marcados en 0,50 y 0,005 g/km. Para los motores gasolina la situación es similar, dado que desde la Euro 4 el límite de reducción de CO se ha establecido en 1,00 g/km.

Límite de emisiones para turismos con motores de gasolina (g·km <sup>-1</sup> )						
Tipo	Año	CO	HC + NO <sub>x</sub>	HC	NO <sub>x</sub>	Partículas
Euro 1	1992	2,72	0,97	-	-	-
Euro 2	1996	2,20	0,50	-	-	-
Euro 3	2000	2,30	-	0,20	0,15	-
Euro 4	2005	1,00	-	0,10	0,08	-
Euro 5	2009	1,00	-	0,10	0,06	0,005
Euro 6	2014	1,00	-	0,10	0,06	0,005
Límite de emisiones para turismos con motores de diésel (g·km <sup>-1</sup> )						
Tipo	Año	CO	HC + NO <sub>x</sub>	HC	NO <sub>x</sub>	Partículas
Euro 1	1992	2,72	0,97	-	-	0,140
Euro 2	1996	1,00	0,70	-	-	0,080
Euro 3	2000	0,64	0,56	-	0,50	0,050
Euro 4	2005	0,50	0,30	-	0,25	0,025
Euro 5	2009	0,50	0,23	-	0,18	0,005
Euro 6	2014	0,50	0,17	-	0,08	0,005

**Tabla 1.2:** Normativas de emisiones desde 1992



**Gráfico 1.1:** Emisiones de CO, PM y HC+NO<sub>x</sub> permitidas en cada normativa.

En principio, los motores diésel (MEC) parecen mejores que los de gasolina (MEP) a la hora de cumplir la normativa. Consumen menos, por tanto, emiten menos CO<sub>2</sub> y CO, pero en cambio producen mayores emisiones de NO<sub>x</sub> y partículas sólidas.

No obstante, este inconveniente puede subsanarse con sistemas de recirculación de gases de escape (EGR), que más adelante se explicará, con tratamientos de los mismos a la salida del motor con catalizadores de reducción, y/o con sistemas de recuperación de energía a través de los gases de escape del motor.

## 1.2. OBJETO DEL PROYECTO

Este Trabajo de Final de Grado, tiene como objetivo la adaptación y validación de una instalación para el ensayo de motores térmicos empleados en automoción. Las tareas establecidas están dirigidas hacia la puesta en marcha e instrumentación de un sistema de recirculación de gases de escape (EGR) de alta presión, así como la validación de los sistemas de adquisición y control de datos de los ensayos previstos.

El motor sobre el que se va a realizar este proyecto es un motor de encendido por compresión (MEC) de inyección directa sobrealimentado con turbina de geometría variable (TGV).

Dicho motor es un R9M fabricado por Renault, dispone de cuatro cilindros en línea, con una cilindrada total de 1.6 litros, siendo su aplicación para vehículos automóviles ligeros hasta 2500 Kg.

La sala en la que se ha realizado este proyecto es una de las salas con las que cuenta el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia situada en el edificio 8P de la misma.

### **1.3. ANTECEDENTES**

El Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia (CMT), realiza una importante labor de investigación desde hace años en lo relacionado con: combustión, renovación de la carga, técnicas experimentales de visualización, mantenimiento, ruido, inyección, transmisión de calor, ingeniería y laboratorio.

Asimismo, durante los últimos años, diferentes investigaciones en lo relacionado con la renovación de la carga en ingeniería y laboratorio, se han realizado en conjunto con la empresa VALEO, la cual ha encargado diversas líneas de investigación al CMT para el análisis, caracterización, evolución y estudio de las emisiones en el motor. En lo relacionado al proyecto, esta empresa ha sido la que suministraba las piezas necesarias para el estudio y análisis de la refrigeración en el sistema de recirculación de gases de escape instalado en el motor a estudiar.

La experiencia del Departamento en todas estas líneas de investigación es muy elevada, debido a la gran cantidad de proyectos fin de carrera, tesis doctorales y trabajos final de grado llevados a cabo que han contribuido al desarrollo de estos campos, tanto a nivel interno, dentro del ámbito universitario, como externo, en las empresas con las que se han firmado convenios de colaboración.

### **1.4. JUSTIFICACIÓN**

La justificación de este proyecto se centra en dos razones principalmente. En primer lugar se realiza con el objetivo de obtener el título de Graduado en Ingeniería Mecánica, y en segundo lugar para adquirir experiencia profesional e incrementar conocimientos en el campo de los MCIAs, siendo partícipe de un proyecto de investigación real.

Por otra parte, debido a los problemas de contaminación que existen hoy en día con los motores diésel y al aumento de las exigencias de la normativa, es importante investigar y estudiar con detenimiento diferentes formas de solventarlos y reducir las emisiones. Para ello la empresa VALEO junto con el Centro de Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia han hecho una propuesta viable para dar una solución a estos problemas.

## 2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA INSTALACIÓN

### 2.1. INTRODUCCIÓN

La sala de ensayos es el lugar en el cual se localiza el motor objeto de estudio. Esta permite convertir el motor en un sistema abierto de información. La sala de ensayos debe reunir una serie de condiciones que la hacen apta para la instalación de un motor en su interior. Algunas de estas condiciones son el tamaño de la sala, la tecnología involucrada y su situación dentro de la misma, las diferentes instalaciones eléctricas, la red de abastecimiento de agua, los sistemas de extracción de humos, etc.

En cuanto al análisis de la sala de ensayos desde un punto de vista del intercambio de energía que se produce en su interior, podemos decir que la sala es un sistema abierto en el que conocemos la naturaleza de los fluidos que entran y salen. Esto nos permite establecer un balance de energía relativo a los procesos que suceden en el interior de la misma. De esta forma determinamos tanto los fluidos que introducimos en la sala como sus transformaciones o productos, enumerados a continuación:

- Fluidos que entran en la sala: combustible, aire de ventilación, agua de refrigeración, corriente eléctrica, aire comprimido.
- Productos: gases de escape, aire de ventilación, agua de refrigeración, corriente devuelta por el freno (en caso de ser eléctrico), pérdidas a través de las paredes y del techo.

Utilizando el balance de energía anterior, se puede estimar la *eficiencia o rendimiento térmico* del motor objeto de nuestro estudio. Para su cálculo, aplicamos la siguiente fórmula (en que conocemos todos los datos):

$$E = \frac{\textit{Potencia\_motor}}{\textit{Potencia del combustible}}$$

Una vez conocidas las características del motor, se selecciona el freno adecuado y la instalación de los elementos auxiliares que deberá disponer la sala, así como los sistemas de regulación que necesitemos.

## 2.2. SITUACIÓN Y ESTRUCTURA

La sala de ensayos en la que se ha realizado el proyecto se encuentra situada en una de las salas de las que dispone el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia, situada en el edificio 8P (zona este de la universidad). Concretamente la sala número 2.

En este edificio (8P) todas las salas se organizan de manera similar. Cada sala tiene en su interior una bancada, en la que se sitúa el motor a estudiar en cada caso, un freno dinamométrico para controlar el régimen de giro del motor, una transmisión para acoplar al motor y un armario acondicionador de combustible, además de los sistemas de ventilación, refrigeración, etc sobre los que se hará una explicación detallada posteriormente.



*Imagen 2.1: sala de ensayos*

Cada sala dispone de una ventana de 82 x 96 cm a través de la cual se puede controlar visualmente el motor de la misma en todo momento mientras la persona responsable de ella trabaja con los equipos de control.

Los equipos de control y adquisición de datos, lugar donde se regula y automatiza el ensayo de la sala, están situados fuera de la misma y detrás de una ventana, como se puede observar en la siguiente imagen:



*Imagen 2.2: zona de control*

## **2.3. SALA DE ENSAYOS**

### **2.3.1. Descripción de la sala**

La sala de ensayos es el lugar en el que se va a realizar todo el trabajo durante un proyecto, tanto durante el montaje de la misma, como durante los ensayos. Por esto, una sala de ensayos debe contar con el espacio suficiente para colocar todos los aparatos de medida e instrumentación necesarios y para poder moverse cómodamente por la misma. Las dimensiones de la sala han de ser tales que permitan que haya un metro alrededor de la bancada, teniendo en cuenta que para calibrar el par del freno se utilizan unos “brazos de calibración” que han de poder ser colocados sin problemas. Por otro lado, la altura ha de ser suficiente para acoplar el motor y el freno (habitualmente mediante la utilización de un polipasto), y permitir el acoplamiento para la extracción de los gases procedentes de combustión.

La sala de ensayos que aloja el motor objeto de dicho proyecto tiene unas dimensiones de 4,50 x 3,50 x 2,93 metros, entre los que se encuentra el motor y todos los aparatos necesarios para su funcionamiento, explicados más adelante.

En cuanto al material utilizado, tanto las paredes como el techo son de hormigón armado con un revestimiento de panel de frío, cuyo espesor es de 170 mm. Este revestimiento permite el aislamiento acústico de la sala, además de mantener una temperatura estable dentro de la misma.

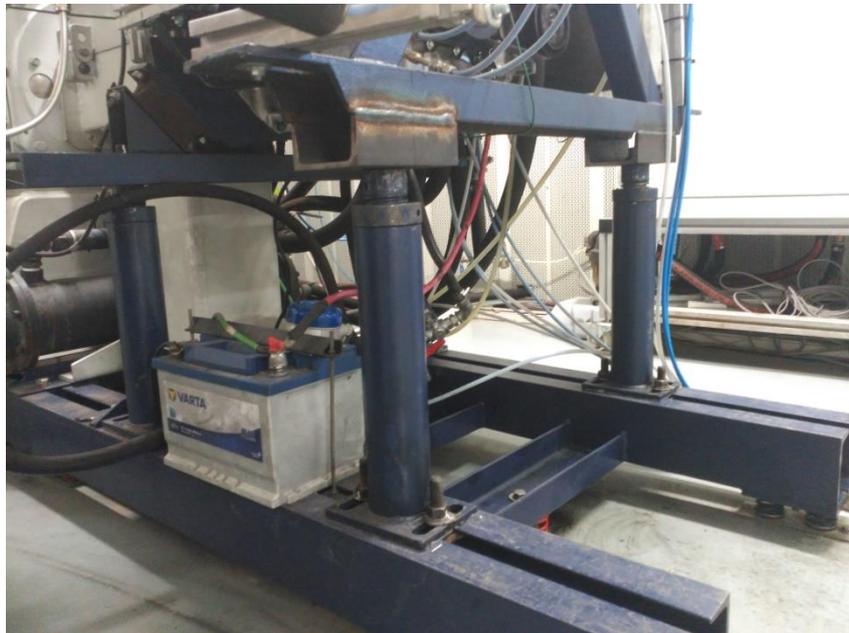
Dentro de la misma sala se encuentra, a la altura del suelo, los cimientos de la bancada, que también son de hormigón armado.

La bancada tiene unas dimensiones de 1.90 metros de longitud x 1.10 metros de ancho. Esta va soportada por distintos muelles situados a ambos lados de la misma, con el objetivo de absorber las vibraciones producidas por el motor y no transmitirlas a los cimientos de la sala.

### **2.3.1.1. Descripción de la bancada**

La misión principal de la bancada es la de soportar el motor y absorber las vibraciones del mismo. Además el freno asíncrono al que se une el motor está ubicado también sobre la misma, ya que no se considera una fuente de vibraciones relevante.

La bancada está formada por 4 perfiles IPE 180 y 2 perfiles UPN 180 en los extremos. Los perfiles IPE 180 están colocados, dos a dos, longitudinalmente separados entre sí. Cada una de estas parejas de perfiles está separada entre sí 25 mm, con el fin de poder anclar en este espacio los soportes del motor o cualquier otro elemento auxiliar. El motor va asentado sobre cuatro torretas, situadas en cada uno de los extremos del motor. En estas torretas están situados unos tornillos de 50 mm de diámetro, que nos permiten modificar la altura de las mismas, con el fin de poder alinear correctamente el motor con el freno. En la siguiente imagen se pueden observar con detalle estas torretas.



**Imagen 2.3:** torretas

### **2.3.1.2. Descripción del freno dinamométrico**

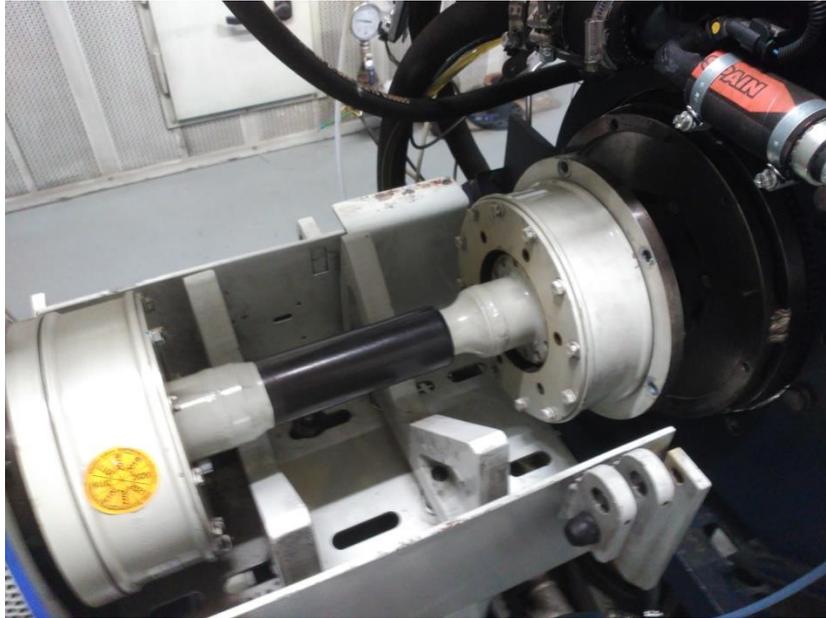
Para controlar la velocidad de giro del motor se utiliza un dinamómetro o freno dinamométrico. La misión del freno dinamométrico es absorber la potencia desarrollada por el motor térmico al que va acoplado, ofreciendo una resistencia al giro de este y simulando de esta manera las resistencias reales con las que el motor se encuentra durante el funcionamiento sobre un vehículo, como pueden ser: pendiente del camino, la fuerza con que se opone el aire a su desplazamiento, el rozamiento con el pavimento, etc. La disipación de esta energía, se hace con el fin de conocer la *potencia efectiva* para cada régimen de giro del motor.

El freno dinamométrico instalado en la sala 2, es un dinamómetro asíncrono Dynas3 LI250 de la marca HORIBA. El funcionamiento de estos frenos eléctricos consiste principalmente en una máquina de inducción cuya función es la de absorber la energía del cigüeñal del motor. Así pues, se genera una corriente eléctrica que es enviada a la red trifásica después de acondicionar su tensión y su frecuencia. La potencia que se disipa es posible determinarla mediante la medida del par resistente y el régimen de giro, o bien midiendo la energía eléctrica generada. La regulación del par de frenado se consigue a través de la variación de los parámetros eléctricos de la corriente del inducido de la máquina eléctrica.

### **2.3.1.3. Descripción de la transmisión**

El acoplamiento entre el motor y el freno se realiza mediante un amortiguador de par. Este tipo de transmisiones son capaces de absorber gran parte de las fuerzas laterales provocadas por una incorrecta alineación del conjunto motor-freno y evitar la rotura de alguno de los elementos de la sala.

Para el acople entre el plato de la transmisión y el volante de inercia del freno, se utiliza un plato intermedio adaptado para esta función. Esto junto a una correcta alineación entre el motor, sujeto en la bancada mediante las torretas, y la transmisión, cumplen la función de evitar la rotura de elementos del motor o del freno.



*Imagen 2.4: transmisión*

## **2.3.2. Sistemas auxiliares de la sala**

### **2.3.2.1. Sistema de ventilación**

La ventilación de la sala es uno de los elementos más importantes, no solo por la habitabilidad de la misma a la hora de mantener un entorno confortable, sino por el correcto funcionamiento de algunos de los elementos situados en su interior. Para ello una de las principales funciones que realiza este sistema de ventilación es la de la extracción de los gases de escape del motor, gases procedentes del combustible y demás compuestos que podemos encontrar en el ambiente.

En definitiva, se trata de mantener en el interior de la sala un ambiente adecuado. De esta manera, dispondremos de un ambiente limpio, sin gases peligrosos, con una humedad y temperatura adecuadas y mantendremos las máquinas que trabajan en el interior de la sala en un rango de temperaturas adecuado.

Inicialmente, la sala de ensayos se plantea como un sistema abierto de intercambio de energías entre fluidos, entre los cuales se encuentra el propio aire de ventilación. En la sala, parte de la energía procedente del par de frenado, que realiza el freno sobre el motor se convertirá en energía eléctrica, la cual se devolverá a la red. Otra parte de esa energía se convertirá en calor, el cual será irradiado a la atmósfera de la sala.

Lo mismo ocurre con el motor, donde la energía creada por el funcionamiento del mismo, gracias al combustible y el aire de admisión, es convertida en energía mecánica en el cigüeñal y en energía calorífica, en el sistema de escape principalmente.

El calor generado por la combustión propia de estos motores, es cedido por convección al sistema de escape, al agua de refrigeración, y mediante los intercambiadores, al agua procedente de la balsa. Y por supuesto, a los metales cercanos a estos elementos, que a su vez la radiarán a la atmósfera de la sala, aumentando la temperatura de la misma. Lo que obliga a enfriarla con aire fresco del exterior. Por todos estos motivos, si no se eliminara de la atmósfera de trabajo el calor generado, sería muy difícil refrigerar las máquinas y todos los elementos auxiliares de control.

#### **Control del sistema.**

El sistema de ventilación de la sala se activa a través de unos interruptores de marcha/paro situados en una caja eléctrica en el pasillo que hay entre las salas, desde donde se controla la ventilación de cada una de las salas de ensayos de esa parte del edificio.

#### **2.3.2.2. Red de agua de refrigeración**

El sistema de suministro de agua a las salas de ensayo de motores está formado por un aljibe de 50.000 litros de capacidad situado bajo el suelo en la parte exterior del edificio, junto con otro de 20.000 litros. El primero de ellos suministra agua a todas las salas de ensayo del edificio y el segundo se encarga de refrigerar las aulas destinadas para prácticas. Esta agua de refrigeración está tratada con aditivos que le confieren propiedades antioxidantes, detergentes y de anti-congelación.

Desde este aljibe, una bomba con motor asíncrono, controlada por un interruptor de puesta en funcionamiento de la sala y localizada en la sala de bombas junto a susodicho, se encarga de llevar el agua hasta las celdas de ensayo, tanto a los motores como a los elementos que requieran de esta refrigeración. Una segunda bomba de características similares, pero de 400 m<sup>3</sup>/h, envía el agua a una torre de enfriamiento situada en el tejado del edificio, cuando la temperatura del depósito supere determinado valor. Una vez allí será enfriada y enviada de vuelta al aljibe.

Para asegurar la ininterrupción de suministro de caudal de agua a las celdas de ensayo, se sitúan en paralelo dos bombas de reserva con las mismas características. Estas entran en funcionamiento cada 50 horas aproximadamente con el fin de no hacer actuar siempre a las mismas bombas, asegurando así que no se producirá una posible rotura de las mismas.

En cuanto a la sala, esta dispone de una toma de agua de red, situada al fondo de la sala detrás del freno. Dispone de una conexión de dos pulgadas que suministra agua a una presión de 2,2 bares, leída esta medida a través de un manómetro situado en la llave de paso del interior de la sala.

### **2.3.2.3. Red de combustible**

El combustible que se suministra tanto a la sala en la que se ha realizado el proyecto, como al resto de salas del edificio, se encuentra en una serie de depósitos localizados en la cara sur del edificio, fuera del mismo, junto al aljibe de agua.

La capacidad de estos depósitos es de 2400 litros en total, divididos en 6 depósitos de 400 litros cada uno. Cuenta con un cierre de seguridad en la parte superior y con válvulas de seguridad en la conducción que lo lleva hasta las salas de ensayo. Además también disponen de válvulas de accionamiento manual que permiten su vaciado en caso de ser necesario.

Desde estos depósitos, gracias a unas bombas que empujan el combustible, este llega primero hasta la azotea del edificio, donde se encuentra un sistema de refrigeración para enfriarlo antes de distribuirlo finalmente a las salas de ensayo de motores. Este atraviesa también una balanza de combustible y un filtro para evitar que la suciedad que se pueda encontrar en él llegue hasta el motor.

### **2.3.2.4. Red de aire comprimido**

La sala de ensayo en la que se ha realizado el presente proyecto dispone de una red de distribución de aire comprimido que queda instalada en la pared mediante un tubo de  $\frac{3}{4}$  de pulgada, la cual dispone de una válvula de control manual para regular la presión deseada. El compresor utilizado es un compresor de tornillo, cuyo principio de funcionamiento se basa en la disminución del volumen del aire en la cámara de compresión donde se encuentra confinado, produciéndose el incremento de la presión interna hasta llegar al valor de diseño previsto (hasta 8 bar), momento en el cual el aire es liberado para distribuirlo a las salas. Este compresor se encuentra localizado en la azotea del edificio, segunda planta del mismo.

### **2.3.2.5. Red eléctrica**

La sala de ensayos dispone de una canaleta de PVC fijada a las paredes, donde se sitúan varias tomas de corriente con enchufes de 220 voltios y 50 Hz. Además, también dispone de varios enchufes de corriente trifásica que no han sido utilizados en este proyecto.

Estas tomas de enchufes se han utilizado principalmente para el opacímetro y para el caudalímetro del agua que circula por el sistema de recirculación de gases de escape, ambos conectados directamente a la red y para otros elementos eléctricos como pueden ser amplificadores de señal, electrónica de control de la posición de la TGV, o el oscilógrafo (no utilizado para este proyecto en concreto, pero forma parte del montaje de la sala).

### **2.3.2.6. Sistemas de seguridad**

Las celdas de ensayo son un foco potencialmente importante de accidentes. Para evitarlos, estas celdas son controladas por sistemas de seguridad en tiempo real, controlados y supervisados siempre por el técnico que se encuentre al cargo de la sala.

En nuestra sala existen sistemas de seguridad de detección de incendios y presencia de gases peligrosos en la atmósfera como son CO y metano.

Estos sistemas de seguridad funcionan mediante señales acústicas y alarmas visuales en los monitores instalados, las cuales indican en que sala y que problema se está produciendo. Además en el panel de control de detección de concentraciones de CO y metano, se puede observar cual es la concentración de cada uno de estos gases que se encuentra en la sala y si es peligrosa o no.

En cuanto a los elementos constructivos de la sala hay que resaltar que las paredes y puertas van recubiertas de un aislante especial de fibra de vidrio que, no solo atenúa el ruido sino también retiene el fuego. Las puertas se abren hacia afuera para poder salir rápidamente si fuera necesario en caso de peligro. El suelo es muy resistente para poder mover sin problemas grandes pesos, como los del freno y del motor. Además, refleja el calor y es antideslizante para evitar posibles accidentes. Se dispone de señales de salida en las puertas principales y salida de emergencia en la puerta situada al final del pasillo de control que conduce directamente a la calle.

## 2.4. DESCRIPCIÓN DEL MOTOR

### 2.4.1. Descripción y características del motor R9M

El motor utilizado para la realización de este Trabajo de Final de Grado, es un motor de la conocida empresa automovilística RENAULT, de origen francés, la cual trabaja directamente con el CMT para la investigación y desarrollo de sus motores. El modelo sobre el que se trabaja es conocido como el R9M, un motor presentado por la empresa francesa en Mayo de 2011. Este es un motor de cuatro tiempos de encendido por compresión (MEC) cuyas características técnicas se presentan a continuación:

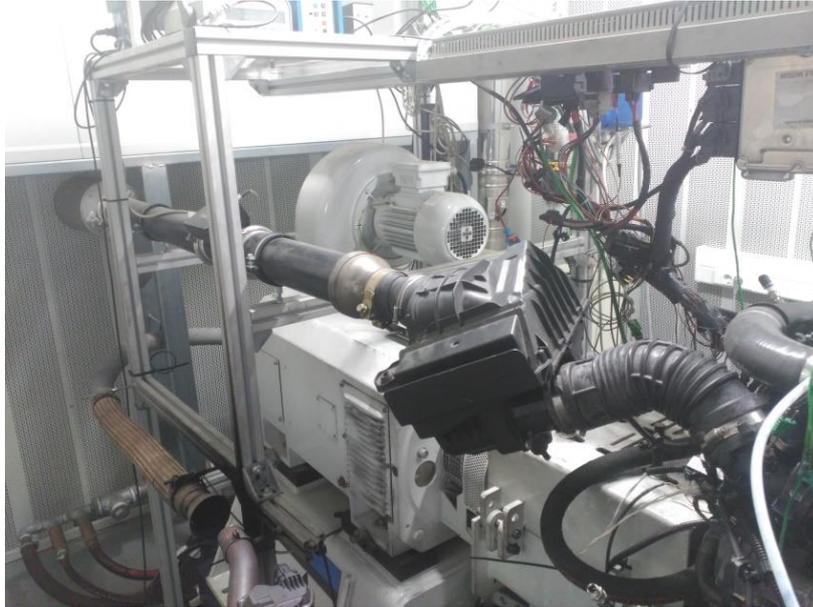
<b>Constructor</b>	RENAULT
<b>Tipo de motor</b>	R9M – 1.6
<b>Número de cilindros</b>	4 en línea
<b>Número de válvulas</b>	16
<b>Distribución</b>	Doble árbol de levas
<b>Cilindrada (cc)</b>	1598
<b>Potencia máxima</b>	130 CV (96 Kw)/4.000 r.p.m
<b>Par motor máximo</b>	320 Nm/1.750 r.p.m
<b>Diámetro x carrera (mm)</b>	80,0 mm x 79,5 mm
<b>Relación de compresión</b>	15,4 : 1
<b>Alimentación</b>	Inyección Common Rail + Turbocompresor
<b>Normativa de emisión de gases</b>	Euro 5
<b>Combustible</b>	Diésel

*Tabla 2.1: características motor R9M*

### 2.4.2. Elementos auxiliares

#### 2.4.2.1. Sistema de admisión de aire

En cuanto al sistema de admisión de aire por parte del motor, este recibe el aire del interior de la sala que se introduce a través de un filtro en un conducto de sección circular de unos 1.80 m de longitud aproximadamente. Colocado en ese mismo conducto, encontramos caudalímetro de aire de tipo sensy-flow. Tras pasar por este conducto, instalado por las personas implicadas en el proyecto, el aire llega a través de un tubo flexible al filtro de aire original del motor, en el que se encuentra instalado de nuevo un caudalímetro, mediante el cual la ECU mide el caudal de aire que le entra al mismo.



**Imagen 2.5:** sistema de admisión de aire

Una vez el aire ha atravesado el filtro, este se introduce en el compresor. Aquí el aire es comprimido, con la finalidad de aumentar su presión para así introducir en el cilindro una mayor cantidad de oxígeno (masa) que la masa normal que el cilindro aspiraría a presión atmosférica.

Debido a la compresión del aire, el fluido aumenta su temperatura, y es por ello que es necesario refrigerarlo antes de introducirlo en los cilindros. Para esta refrigeración se instala a la entrada del colector de admisión un intercambiador de calor. La función de este es la de disminuir la temperatura del aire para así aumentar su densidad y obtener una mayor eficiencia del motor.

En el montaje original del motor, el intercambiador de calor es del tipo aire-aire, un intercambiador de aletas que se encuentra situado en la parte delantera del vehículo, cuyo fluido refrigerante es el aire proveniente del exterior, por convección. Sin embargo, en la sala de ensayos este intercambiador es tipo aire-agua, debido a que al estar el motor localizado en una sala cerrada la instalación de un intercambiador de calor aire-aire de la manera en la que se localiza en un coche requiere de una instalación mucho más compleja.

Nuestro intercambiador de calor está formado por una serie de tubos que le hacen llegar agua fría directamente desde la red de distribución. La temperatura de esta agua es menor que la del aire que circula por el interior del intercambiador y por lo tanto se produce una cesión de calor a nuestro líquido refrigerante. El flujo de los fluidos es en contracorriente, para obtener una mayor eficiencia. Otro detalle es que el conducto de entrada de agua se sitúa abajo, y el de salida arriba, con esto conseguimos evitar cualquier burbuja de aire, que afectaría a nuestro sistema.

La cantidad de líquido refrigerante introducida en el intercambiador está controlada por un regulador PID, el cual mantiene en todo momento el nivel del agua necesario para no producir un desbordamiento, o que este se quede sin agua.

Tras haber disminuido la temperatura del aire de admisión con este sistema de refrigeración, el aire es introducido a los cilindros para ser mezclado con el combustible.

#### **2.4.2.2. Sistema de alimentación de combustible**

En cuanto al sistema de alimentación de combustible de la sala de ensayo, como ya se ha explicado anteriormente, el combustible llega hasta la sala desde unos depósitos situados en el exterior del edificio. Una vez el combustible llega a la sala, este pasa por un acondicionador de combustible que se encuentra en la misma, cuya función es dotar al combustible de la presión y la temperatura adecuadas para posteriormente llevarlo directamente hasta el motor, además de filtrarlo para que el motor lo reciba con la menor cantidad de impurezas posible. Las características del combustible a la salida de este acondicionador son de una temperatura en torno a los 25°C y una presión de 5 bares.

#### **2.4.2.3. Sistema de refrigeración**

En este caso, se ha optado por sustituir el sistema de refrigeración de aire-agua, típico de los automóviles, por un sistema de tipo agua-agua, con intercambiadores de carcasa y tubos. Esto se debe a una mayor facilidad para la regulación y control de la temperatura del agua de refrigeración del motor.

Con el objetivo de tener el control sobre la temperatura del motor, se ha instalado un termopar a la entrada del circuito de agua del mismo. Con este termopar conocemos en todo momento la temperatura a la que está entrando el agua en nuestro motor y, gracias a un regulador PID (regulación proporcional integral derivativo) que compara la temperatura proveniente del termopar con el valor que tiene como consigna, permitiremos el paso de más o menos agua de refrigeración para mantener la temperatura del motor en la que tenemos establecida.

En referencia al tipo de intercambiadores empleados, se utiliza, como se ha dicho anteriormente, un intercambiador de calor de carcasa y tubos. Estos intercambiadores están formados por dos cámaras de presión independientes (lado carcasa y lado tubos). Por las dos cámaras fluyen dos medios de tal forma que cuando existe una diferencia de temperatura entre ellos, el calor se intercambia sin que los medios se mezclen. Uno de los medios fluye por el lado de la carcasa, mientras que el otro fluye por el interior de los tubos. En la carcasa se encuentran bafles cuya función es forzar a que la dirección del flujo sea lo más perpendicular

posible a los tubos. La forma y la distancia entre los bafles varían en función del uso al que estén destinados.

Según la finalidad, velocidad y pérdida de presión, el paso del flujo por los tubos se realizará una o múltiples veces. Si exceptuamos la pérdida de calor por radiación, la cantidad de calor de entrada es igual a la de calor transferido.

Este tipo de intercambiadores se clasifican en dos posibles combinaciones, flujo paralelo o flujo en contracorriente. Si los fluidos entran por el mismo extremo del intercambiador y circulan en la misma dirección hasta el otro extremo se trata de intercambiadores de flujo paralelo. Si por el contrario, los fluidos entran por extremos diferentes y su sentido es opuesto, se trata de intercambiadores de flujo a contracorriente.



**Imagen 2.6:** intercambiador de calor de carcasa y tubos

#### **2.4.2.4. Sistema de escape**

El sistema de escape se encarga de evacuar los gases que se producen en la combustión del motor a la atmósfera, teniendo en cuenta que se deben mitigar tanto el ruido como los gases nocivos para la salud.

El sistema de escape que se ha empleado en este motor es un tubo de escape al cual se le realizaron las modificaciones oportunas para adaptarlo y situarlo en el interior de la sala, y colocar su extremo junto a la entrada del conducto de extracción de los gases de escape.

El sistema de escape de un motor comienza en el momento en que se realiza la combustión del motor y los gases llegan al colector de escape. Una vez producida esta combustión los gases de escape atraviesan distintos elementos:

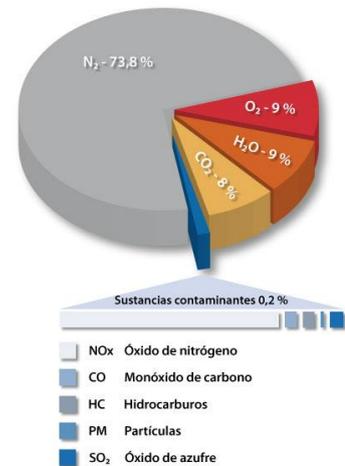
- **Sistema de recirculación de gases de escape (EGR):** se diferencian dos tipos de EGR, el primero de ellos se hace de la entrada de la turbina a la salida del compresor (EGR de alta presión) y el segundo de la salida de la turbina a la entrada del compresor (EGR de baja presión). Este último se realiza una vez se haya llevado a cabo el post tratamiento de gases. La recirculación de gases de escape es una estrategia ampliamente empleada para reducir la formación de NO<sub>x</sub> por vía térmica. Este sistema consiste en hacer recircular parte de los gases de escape hacia la admisión. En este motor el gas recirculado es refrigerado antes de introducirlo en la admisión para aprovechar mejor los beneficios en cuanto a la reducción de NO<sub>x</sub>.
- **Turbina de geometría variable (TGV):** la TGV está localizada a la salida del colector de escape y sus funciones principales son, por un lado, aprovechar la energía de los gases de escape para transformarla en energía mecánica en el eje para mover el compresor, y por otro lado, expandir los gases de escape para disminuir su presión y temperatura.
- **Sistema de tratamiento de gases de escape:** en el motor sobre el que se ha trabajado este sistema de tratamiento de gases de escape se conforma de un catalizador de oxidación (DOC), que contribuye a la atenuación del ruido y a la reducción de CO y HC y de un DPF (Diesel Particulate Filter), cuya finalidad es la de atrapar el hollín producto de la combustión y reducir la cantidad del mismo que se expulsa a la atmósfera. En este proyecto el DPF ha sido retirado, debido a que requiere de un proceso de regeneración y esto nos ocupaba demasiado tiempo.
- **Válvula de contrapresión:** esta válvula se encuentra situada al final del tubo de escape. Está instalada principalmente debido a que como hemos prescindido del sistema de tratamiento de gases de escape debido a la incomodidad que suponía a la hora de realizar el proyecto, es una manera de compensar la resistencia que oponen estos elementos al paso del gas de escape.

### 2.4.3. Principales emisiones contaminantes

Atendiendo al reglamento N° 715/2007 del parlamento europeo, capítulo II, artículo 4, sobre las obligaciones de los fabricantes, *“las medidas técnicas adoptadas por el fabricante deberán garantizar que se limiten eficazmente las emisiones del tubo de escape y las emisiones evaporantes a lo largo de la vida normal del vehículo y en condiciones normales de utilización. Para cumplir este ensayo de durabilidad, los fabricantes deberán tener la posibilidad de hacer uso del envejecimiento en banco de pruebas.”*

Como es bien sabido, el principal inconveniente de los MCIAs son las emisiones que se producen a través del sistema de escape, producto de la combustión. El control de las emisiones contaminantes es el factor que gobierna el diseño de los sistemas de combustión modernos. A continuación se explican cuáles son los contaminantes más importantes:

- Monóxido de carbono (CO): el monóxido de carbono es un gas inodoro e incoloro. La formación de CO se debe básicamente a la disociación de las moléculas de  $\text{CO}_2$  a temperaturas elevadas y generalmente se dan en condiciones de mezcla rica. Es por ello que las emisiones de CO están controladas principalmente por el dosado, siendo más importantes en los motores de gasolina que en los diésel.
- Óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ): mayoritariamente, estos óxidos de nitrógeno que forman parte de los gases de escape son NO y  $\text{NO}_2$ . Estos son los principales responsables de la lluvia ácida y productores del *smog* fotoquímico. La formación de los  $\text{NO}_x$  tiene relación con las altas temperaturas de la combustión.
- Hidrocarburos (HC): los hidrocarburos sin quemar se emiten, principalmente, debido a la combustión incompleta del combustible. La formación de estos se puede dar debido a numerosos factores, como pueden ser insuficiente evaporación del combustible, fugas de escape, combustible atrapado en pequeños volúmenes o dosados locales extremos.
- Partículas: se considera partícula a cualquier materia presente en los gases de salida del motor que se encuentre en estado líquido o sólido en condiciones ambientales. El proceso de formación de partículas ocurre mayoritariamente en el proceso de dilución y en función de cómo se realice este proceso, este fenómeno puede acentuarse o verse reducido.
- Óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ): el azufre se encuentra habitualmente en los combustibles líquidos. Las emisiones de óxidos de azufre en un MCIAs son mínimas, ya que actualmente la mayor parte de los  $\text{SO}_x$  emitidos provienen del uso del carbón.



## 2.5. INSTRUMENTACIÓN Y MEDIDA DE PARÁMETROS

A la hora de estudiar el comportamiento del motor, una correcta instrumentación de los parámetros más importantes del mismo es imprescindible para ensayarlo de una manera segura y completamente controlada.

En este proyecto el motor se ha instrumentado principalmente mediante termopares para la medida de temperaturas y sensores de presión para la medida de presiones, además de otros sensores como son el sensor de régimen de turbo, caudalímetro de aire, etc.

Debido a que el trabajo se ha centrado en ensayos de intercambiadores de calor del sistema de recirculación de gases de escape (EGR), este circuito ha sido instrumentado de una manera más minuciosa de lo que se suele hacer con normalidad, instalando sensores de presión y de temperatura tanto a la entrada como a la salida de los gases que circulan por el intercambiador de calor. Además también se han instalado termopares en la entrada y salida del agua de refrigeración del este y un sensor de presión a la salida. Todo esto debido también a las exigencias de la empresa VALEO, para la cual se ha realizado el estudio de estos intercambiadores de calor.

A continuación se presenta un listado de todos los parámetros medidos del motor, mediante una tabla con el nombre de las variables y una pequeña descripción:

Variables medidas	Descripción
Speed	Régimen de giro del cigüeñal del motor
Torque	Par del motor
Throttle	Porcentaje de pedal
T_adm	Temperatura admisión de aire en el colector
T_sala	Temperatura ambiente de la sala
T_E_Comp	Temperatura a la entrada del compresor
T_E_WCAC	Temperatura a la entrada del WCAC
T_pipe1	Temperatura en la pipa de admisión 1
T_pipe2	Temperatura en la pipa de admisión 2
T_pipe3	Temperatura en la pipa de admisión 3
T_pipe4	Temperatura en la pipa de admisión 4
T_pipe5	Temperatura en la pipa de admisión 5
T_pipe6	Temperatura en la pipa de admisión 6
T_pipe7	Temperatura en la pipa de admisión 7
T_pipe8	Temperatura en la pipa de admisión 8
T_E_Turb	Temperatura a la entrada de la turbina
T_S_Turb	Temperatura a la salida de la turbina
T_E_W_Mot	Temperatura del agua a la entrada del motor
T_S_W_Mot	Temperatura del agua a la salida del motor
T_E_W_WCAC	Temperatura del agua de red a la entrada del WCAC
SP_E_W_Mot	Set Point de la temperatura de entrada del agua del motor
SP_S_WCAC	Set point de la temperatura de salida del aire en el WCAC
T_Oil	Temperatura del aceite del motor
P_Oil	Presión del aceite del motor
P_sala	Presión ambiente de la sala

<b>P_E_Comp</b>	Presión a la entrada del compresor
<b>P_S_Turb</b>	Presión a la salida de la turbina
<b>P_S_WCAC</b>	Presión a la salida del aire del WCAC
<b>Rpm_turbo</b>	Régimen de giro del turbocompresor
<b>Q_Mot</b>	Caudal de agua del motor
<b>ACC_vlv_WCAC</b>	Accionamiento de la válvula que permite la entrada de agua en el WCAC
<b>M_aire</b>	Caudal de aire en la admisión
<b>EGRCO2</b>	Medida de EGR con el HORIBA
<b>EGR</b>	Fracción de EGR
<b>DirectCO2</b>	Medida de CO <sub>2</sub> con el HORIBA
<b>DirectCO2Range</b>	Rango de medida de CO <sub>2</sub> del HORIBA
<b>DirectCOL</b>	Medida de CO con el HORIBA
<b>DirectCOLRange</b>	Rango de medida de CO del HORIBA
<b>DirectNOX</b>	Medida de NO <sub>x</sub> con el HORIBA
<b>DirectNOXRange</b>	Rango de medida de NO <sub>x</sub> del HORIBA
<b>DirectTHC</b>	Medida de HC con el HORIBA
<b>DirectTHCRange</b>	Rango de medida de HC del HORIBA
<b>DirectO2</b>	Medida de O <sub>2</sub> con el HORIBA
<b>DirectO2Range</b>	Rango de medida de O <sub>2</sub> del HORIBA
<b>DirectCOH</b>	Medida de CO con el HORIBA
<b>DirectCOHRange</b>	Rango de medida de CO del HORIBA
<b>MassFlow</b>	Gasto de aire de admisión
<b>PressureFuelOutlet</b>	Presión del combustible
<b>TempFuelOutlet</b>	Temperatura del combustible
<b>T_S_DOC</b>	Temperatura a la salida del catalizador de oxidación
<b>Lambda</b>	Dosado de la mezcla
<b>T_e_coolEGR</b>	Temperatura del aire a la entrada del EGR
<b>T_s_coolEGR</b>	Temperatura del aire a la salida del EGR
<b>P_e_coolEGR</b>	Presión del aire a la entrada del EGR
<b>P_s_coolEGR</b>	Presión del aire a la salida del EGR
<b>T_E_W_INT_EGR</b>	Temperatura del agua de refrigeración a la entrada del EGR
<b>T_s_W_coolEGR</b>	Temperatura del agua de refrigeración a la entrada del EGR
<b>P_s_W_coolEGR</b>	Presión del agua de refrigeración del EGR
<b>P_S_DPF</b>	Presión a la salida del filtro de partículas
<b>Opacidad</b>	Opacidad del gas de escape medido a la salida de la turbina
<b>Q_W_EGR</b>	Caudal de agua que circula por el EGR

**Tabla 2.2:** variables medidas del motor

### 2.5.1. Medida de parámetros fundamentales

Los parámetros fundamentales son aquellos parámetros que dan información directa de las prestaciones del motor: par, consumo de combustible y potencia. Por otro lado, estos parámetros permiten obtener las curvas características del motor, tanto a plena carga como a cargas parciales. Para la realización de los ensayos de motores hay dos variables básicas que definen las características de funcionamiento del motor:

- El grado de carga, que en un MEC se regula actuando sobre el sistema de inyección.
- El régimen de giro, que se regula por un elemento externo que disipa la potencia desarrollada por el motor. En este caso, que estamos trabajando en un banco de ensayos, este elemento es el freno dinamométrico.

#### **2.5.1.1. Par y régimen de giro del motor**

Como se ha comentado anteriormente, el par efectivo es una de las magnitudes fundamentales, puesto que de ella se derivan las curvas características del motor ensayado. Lo mismo se puede decir del régimen de giro del motor, debido a su relación directa con el par, por lo que ambas variables deben tratarse de forma paralela.

El par motor se mide acoplado al motor un dispositivo cuya característica resistente se puede variar, pudiéndose obtener, si medimos el régimen de giro del motor, la potencia correspondiente desarrollada por el mismo. Este dispositivo es una célula de carga, y consta básicamente de una parte móvil (rotor), una fija (estator) y un dispositivo de medida de fuerza. El rotor del freno está acoplado al árbol de salida del motor. El par motor se transmite desde el rotor al estator generalmente por medio de un fluido o de un campo magnético. Al poseer el estator un montaje basculante, que permite que gire sobre su propio eje, aquél intentaría girar en el mismo sentido que el rotor. Un brazo unido al estator, que posee un punto de apoyo a una distancia del eje de giro, impide este giro, dando lugar a la aparición de una fuerza  $F$  en dicho punto. Este punto de apoyo actúa sobre el dispositivo de medida de fuerza, obteniendo así el par instantáneo del motor.

Otro factor muy importante que debemos tener en todo momento controlado y disponer de la posibilidad de cambiarlo a nuestro parecer según las necesidades que tengamos en cada momento es el régimen de giro del motor. El régimen de giro expresa la velocidad en rpm a la que gira el cigüeñal. Este parámetro es posible medirlo gracias a un sensor óptico equipado en el dinamómetro que obtiene la lectura del paso de los dientes del volante. El resultado de esta medida es instantáneo y le llega al operador de la sala a través de la interfaz del programa STARS.

#### **2.5.1.2. Gasto de combustible**

La medida del gasto de combustible es de interés tanto para conocer el consumo de combustible como para determinar el dosado y el consumo específico del motor. Esta medida consiste en determinar el tiempo empleado por el motor, funcionando de manera estable, en consumir una determinada cantidad de combustible.

Por tanto, el tiempo de medida debe ser, por un lado, lo suficientemente largo como para evitar grandes errores de medida y, por otro, lo bastante corto como para garantizar condiciones de funcionamiento estable del motor durante la medida. En los MCI, el tiempo de medida recomendado se comprende entre 30 y 60 segundos.

Para la medida de este parámetro, la solución empleada en el caso del motor que estamos tratando es el método volumétrico, en el que se determina el tiempo empleado por el motor en consumir un volumen conocido de combustible existente en una probeta aforada, instalada en paralelo con el depósito de combustible y conectada con éste y el motor mediante una válvula de tres vías. Todo este sistema va instalado en el armario del acondicionador de combustible, ya nombrado en puntos anteriores.



*Imagen 2.7: armario acondicionador de combustible*

## **2.5.2. Medida de parámetros específicos**

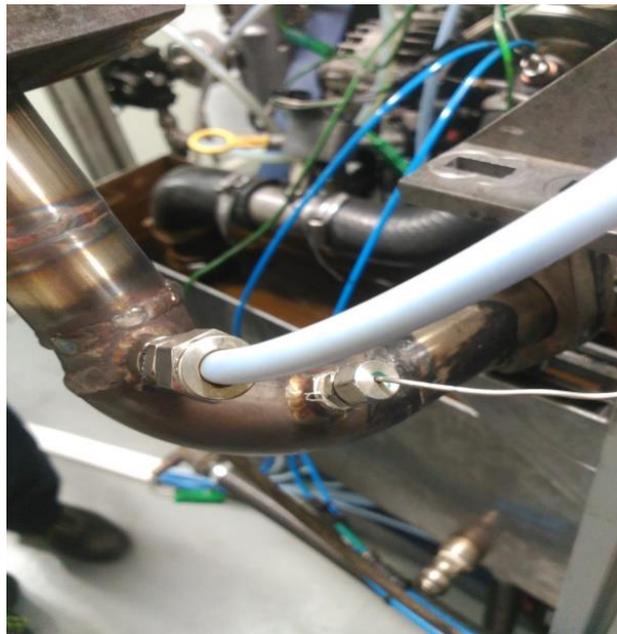
### **2.5.2.1. Presión**

La medida de la presión tiene una importancia notable, tanto en los colectores de admisión y escape, para el estudio del proceso de renovación de la carga si se requiere, como para el control de sistemas auxiliares del motor.

En el caso del ensayo de nuestro motor, una de las medidas de presión más importantes que están instrumentadas es la presión de aceite de motor, indispensable para mantener un correcto funcionamiento y asegurarse de que no existe ningún peligro. Esta presión, en los

puntos de trabajo que se han estudiado, suele establecerse en un rango comprendido entre 3 y 4,5 bares.

Por otro lado, en el proyecto sobre el que se ha trabajado hay que tener en cuenta la diferencia de presiones que existe en el intercambiador de calor del EGR, debido a que por especificaciones del fabricante, se corre peligro de rotura del mismo en el caso de que la diferencia de presión que existe entre el aire que circula por el interior y el agua que lo refrigera sea superior a 1 bar. Para ello ambos fluidos, aire y agua, han sido instrumentados con sensores de presión como el que se puede observar en la siguiente imagen:



**Imagen 2.8:** sensor de presión

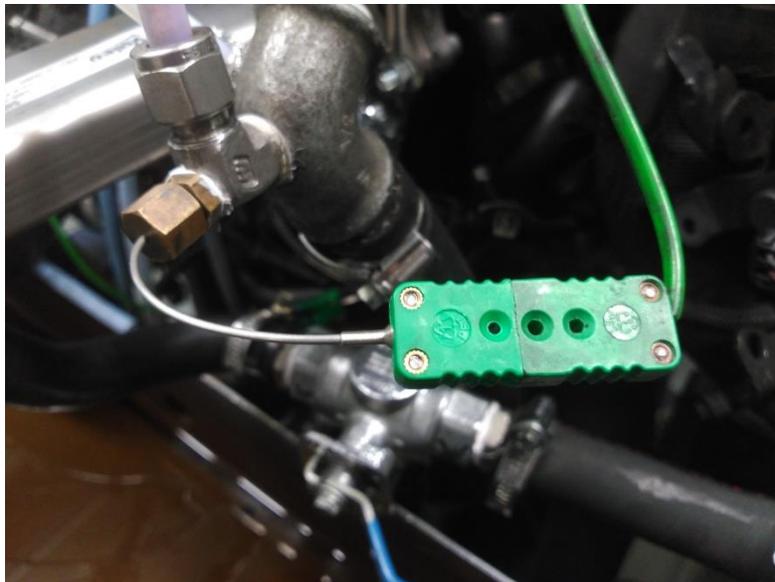
### **2.5.2.2. Temperatura**

La temperatura es una magnitud física intensiva que se mide mediante termistores eléctricos (termopares). Su medida se realiza por transferencia de calor entre el medio a medir y el elemento de medida, por lo que ambos deben llegar al equilibrio térmico antes de que la señal de salida del transductor sea representativa de la temperatura del medio.

Por ello, la medida de la temperatura en muchos de los procesos del motor es quizá la labor más imprecisa, ya que en ocasiones es imposible garantizar un estado de equilibrio entre el medio y el elemento de medida, debido fundamentalmente a los elevados tiempos de respuesta de los captadores disponibles. Sin embargo, la estimación de la temperatura es fundamental para el estudio de diversos procesos asociados al funcionamiento del motor.

Como se ha dicho antes, la medida de la temperatura la hemos realizado mediante termopares, que, por su simple funcionamiento, estos captadores son los más utilizados para la medida de la temperatura. Los termopares se basan en la propiedad que tienen los conductores metálicos que generan una fuerza electromotriz al someter a sus extremos a una diferencia de temperatura.

Por su mayor linealidad, los termopares aplicados en este motor son los formados con cromel-alumen (tipo K). Entre las ventajas de estos termopares se puede destacar su bajo coste, su bajo tiempo de respuesta y que no necesitan fuente de alimentación. Además, el amplio rango de temperaturas que pueden cubrir los termopares los hacen adecuados para la medida de temperatura en cualquier zona del motor, incluso en aquellas donde la temperatura es muy elevada, como en el sistema de escape.



**Imagen 2.9:** termopar

### **2.5.2.3. Gasto de aire**

La medida del gasto de aire en motores es también una labor de considerable dificultad pero de gran importancia, ya que el motor es una máquina en la que el fluido de trabajo es fundamentalmente aire. Por otro lado, la exacta cuantificación de la masa admitida por el motor es fundamental para el diagnóstico de la combustión en un MCI, pues uno de los parámetros a tener en cuenta es la mezcla aire/combustible con la que se realiza la combustión en los cilindros.

En esta sala de ensayos, la medida del gasto de aire admitido por el motor es medida a través de un caudalímetro del tipo *sensyflow*, el cual permite una instalación y manejo

sencillos con resistencia a la contaminación. Este tipo de caudalímetros garantiza una gran fiabilidad operacional y una buena precisión en las mediciones tomadas.

#### **2.5.2.4. Emisiones de contaminantes**

La medida de contaminantes es una de las partes más importantes de este proyecto, ya que la empresa VALEO, para la cual se está realizando el estudio de sus intercambiadores de calor, requiere de algunos datos relacionados con las emisiones del motor.

Los analizadores para la medida de las emisiones de los gases de escape deben ser lo suficientemente sensibles como para detectar pequeñas cantidades presentes en la muestra, especialmente en las emisiones diluidas, y evitar interferencias significativas con otros gases que pueden estar presentes. Para la medida de estas emisiones, la sala está dotada de dos aparatos encargados de proporcionar esta información.

#### **Opacímetro AVL415**

Este aparato se encarga de la medida de la opacidad de los gases de escape del motor. Se basa en la medida de opacidad de un filtro, después de haber sido atravesado por una muestra no diluida de los gases de escape. El grado de opacidad se mide mediante una célula fotoeléctrica cuya escala más baja (0) se ajusta midiendo el grado de blancura del mismo filtro no contaminado. El uso de este sistema está limitado a la medida de la opacidad de los gases de escape en motores funcionando en condiciones estacionarias. La opacidad se cuantifica por un número (FSN) en la escala de 0 a 10, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$FSN = 10 \left( 1 - \frac{\text{valor reflectométrico de la muestra}}{\text{valor reflectométrico del patrón}} \right)$$



**Imagen 2.10:** Opacímetro AVL415

#### **Analizador de gases HORIBA MEXA-7170DEGR**

Este sistema es un analizador de gases de escape, cuyo funcionamiento se basa en la toma de muestras de gases emitidos por el motor, mediante una sonda instalada en el conducto de escape del mismo.

Los gases que somos capaces de medir con este aparato son los siguientes: monóxido de carbono (CO), medido en partes por millón (ppm) y en tanto por cien de la muestra evaluada, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), oxígeno (O<sub>2</sub>) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). Asimismo, también nos muestra el valor de la relación aire-combustible y el porcentaje de gases recirculados del escape a la admisión (EGR).

## **2.6. SISTEMA DE CONTROL Y ADQUISICIÓN DE DATOS**

En este apartado se van a exponer de manera detallada como se ha llevado a cabo la adquisición de datos y los programas utilizados para toma de los mismos y el control del motor de la sala.

Como ya se ha expuesto en capítulos anteriores, una vez se han instalado las modificaciones requeridas para este proyecto en el motor, como son la instalación de un circuito de EGR ampliado para poder introducir el intercambiador de calor apropiado en cada caso, o la instrumentación necesaria en el mismo para la toma de datos (termopares, sensores de presión, sondas para la toma de datos de las emisiones de gases de escape...), la labor que le sigue a continuación consiste en el control del motor mediante los ordenadores instalados en la parte externa de la sala, desde donde se controla también, de manera visual a través de una ventana, el motor que hay en el interior de la sala de ensayos.

En primer lugar, este sistema de control se compone de dos ordenadores con tres monitores y otro monitor aparte para la toma de datos de opacidad. Los programas utilizados en esta parte del proyecto han sido los siguientes:

### **STARS Engine**

El primer ordenador, tiene instalado en su software el programa STARS Engine. Este programa controla el freno dinámico instalado en la sala. El programa STARS permite un amplio abanico de toma de datos y de parámetros de funcionamiento del motor, pero en nuestro caso las principales funciones utilizadas han sido las siguientes:

- Arranque del motor, control del armario de combustible y de la batería del motor de manera instantánea y a tiempo real. Además del control en todo momento del régimen de giro del cigüeñal, par motor y porcentaje de pedal.
- Control de todos los sensores instalados en el motor, principalmente sensores de temperatura y presión. Estos datos son tomados también de manera instantánea y están siempre desplegados en un monitor para asegurar de que el funcionamiento del motor es correcto en todo momento.
- Medida de emisiones de gases de escape mediante el control del Analizador de gases HORIBA MEXA-7170DEGR. Estos datos no han sido tomados durante todo el ensayo, sino que cada media hora se tomaban medidas de las emisiones del motor, ya que su funcionamiento ha sido en régimen estacionario y solo era necesario el análisis de las emisiones cada cierto tiempo para verificar que no ha habido variaciones.
- Elaboración de una hoja Excel tras el ensayo en la que se recogen todos los datos adquiridos durante las horas en las que ha estado el funcionamiento el motor, para

su posterior análisis y procesado con el objetivo de enviarlo a la empresa que los requiere (en este caso VALEO). Este programa permite la grabación de datos cada cierto tiempo (ajustable por el operador), que en nuestro caso ha sido cada 10 segundos de funcionamiento y durante el tiempo que dure el ensayo. Una vez finaliza este tiempo se genera de forma automática una hoja Excel donde se recogen todos los datos del motor (recogidos en el punto 2.5 del presente documento).

## **INCA**

INCA es un software de medición, calibración y diagnóstico implementado durante todas las fases de desarrollo de unidades de control electrónico (ECU). Con este programa puedes modificar muchos de los parámetros de la ECU del motor, con el objetivo de ajustarlo a tus necesidades.

En nuestros ensayos hemos requerido este programa principalmente para regular la apertura de la válvula de EGR, la cual ha sido el objeto del ensayo. Otro de los parámetros que nos ha sido necesario modificar para encontrar uno de los puntos de operación ha sido la posición de la turbina de geometría variable (TGV), ya que al dejarla actuar libremente con los parámetros instalados de serie en la ECU, esta no nos permitía alcanzar uno de los puntos de trabajo necesarios para el estudio del intercambiador de calor del EGR.

Además de modificar ciertos parámetros, también nos permite visualizar otros que puedan ser de nuestro interés, como por ejemplo el dosado de la mezcla, la temperatura del combustible, el gasto de aire admitido por el motor e infinidad de parámetros más.

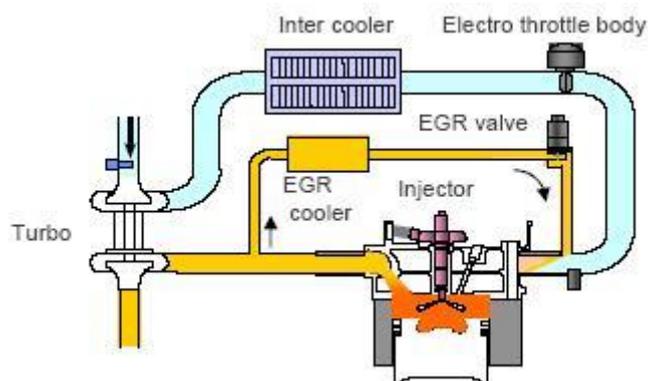
## **Opacímetro**

El último monitor del que disponíamos en la zona de control y toma de datos de la sala de ensayos nos permitía observar únicamente la opacidad de los gases de escape del motor. Usualmente este dato se asocia al programa STARS Engine descrito anteriormente, pero por ciertos problemas que se produjeron para su configuración decidimos finalmente instalar un monitor que nos indicara la medida de este parámetro. Su funcionamiento es simple, tal como pulsar un botón para la medida de la opacidad en el momento que se requiera, el aparato realiza tres medidas de la opacidad que seguidamente se muestran en la pantalla junto con la media ponderada de los mismos, la cual tomábamos como dato para adjuntarlo junto con la hoja Excel generada con el programa STARS Engine. Estos datos se obtienen en las unidades de FSN o en porcentaje.

### 3. SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE GASES DE ESCAPE

#### 3.1. INTRODUCCIÓN

La recirculación de gases de escape (EGR del inglés “Exhaust Gas Recirculation”) es una técnica ampliamente extendida y muy utilizada en la actualidad que tiene como objetivo reducir las emisiones de  $\text{NO}_x$  en motores térmicos. Esta técnica consiste en introducir de nuevo en los cilindros del motor parte de los gases de escape procedentes de combustiones anteriores. Con esta técnica se incrementa la proporción de gases inertes ( $\text{CO}_2$  y agua) en la cámara de combustión. Estos gases inertes no participan en la combustión, sino que permiten reducir la temperatura local en el cilindro, además de que disminuyen la concentración de oxígeno en el interior del mismo. Bajo estas condiciones, la combustión se realiza de una manera más lenta, disminuyendo el pico de presión y temperatura, cumpliendo así con el objetivo de disminuir las emisiones de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ).



**Gráfico 3.1:** sistema de EGR de alta presión

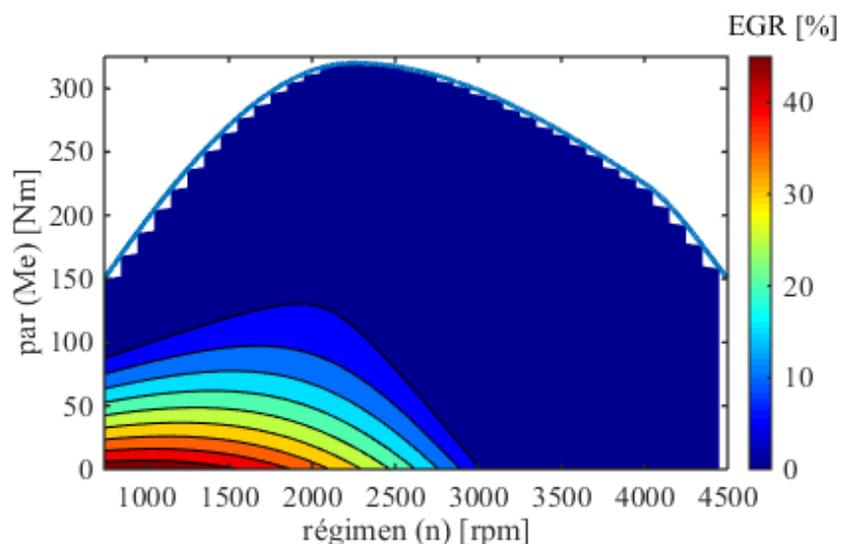
En el gráfico 3.1 se puede apreciar el esquema de un circuito de EGR de alta presión, representativo del que ha sido instalado en la sala objeto de este proyecto. En primer lugar, observando el circuito del aire fresco (azul) desde la admisión (flecha negra que se dirige hacia el turbo), este llega hasta el turbocompresor, donde el fluido es comprimido y mandado directamente hacia el colector de admisión. Antes de llegar es necesario refrigerarlo mediante el intercooler ya que, como se ha explicado anteriormente el aire debe de entrar lo más frío posible al colector. Este intercooler o intercambiador de calor es del tipo agua-aire, ya que refrigeramos el aire que pasa a través de los tubos hasta el colector mediante el agua procedente de la red. Tras este elemento encontramos la válvula de admisión, la cual regula el caudal de aire que le llega al colector. Una vez atravesamos esta válvula el aire llega a los cilindros, donde se produce la combustión. Entonces el gas de escape (amarillo) producto de esta combustión sale de los cilindros y, como se puede observar, parte de ese gas de escape se dirige hacia la turbina para ser expulsado hacia el exterior y otra parte se recircula de nuevo hasta la admisión (circuito de EGR). En este circuito de EGR encontramos dos elementos, el

primero de ellos es un intercambiador de calor para refrigerar el aire recirculado hacia la admisión, refrigerado mediante el agua del motor, y el segundo elemento es la válvula de EGR, encargada de permitir un mayor o menor flujo de aire recirculado. Como se puede ver el aire recirculado es devuelto directamente al colector de admisión para introducirlo a los cilindros.

La cuantificación de la cantidad de EGR recirculada por parte de la válvula en cada punto de operación del motor se denomina tasa de EGR, establecido como una relación entre la masa total admitida por el motor y la cantidad de gas recirculado, recogido en la siguiente ecuación:

$$EGR = \frac{\dot{m}(EGR)}{\dot{m}(aire) + \dot{m}(EGR)}$$

La válvula de EGR en un coche regula su apertura mediante la ECU, la cual dependiendo del régimen y del par que esté dando en cada momento el motor produce un mayor o menor grado de apertura. En el siguiente gráfico aparecen los valores típicos de EGR en función del punto de operación del motor. Como se puede observar, esta técnica es muy utilizada en condiciones de baja carga del motor, debido a que en las pruebas de homologación que deben pasar los vehículos donde se limitan las emisiones de óxidos de nitrógeno, gran parte de estas se dan en las condiciones señaladas. En algunos casos, estas tasas de recirculación de gases de escape superan el 40%, lo que significa que casi la mitad del aire que entra en los cilindros en estos casos proviene de los gases de escape de combustiones anteriores, mientras que el restante 60% es aire fresco del exterior.



**Gráfico 3.2:** tasa de EGR en función del punto de operación

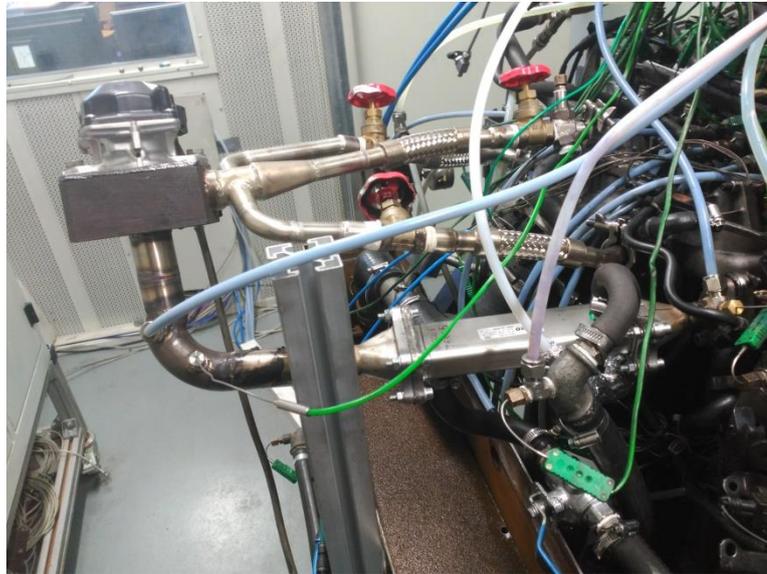
### 3.2. ADAPTACIÓN SISTEMA DE EGR E INSTRUMENTACIÓN

Para la realización de este proyecto se han tenido que realizar ciertas modificaciones en el circuito de EGR original del motor, con el fin de facilitar las tareas posteriores de mantenimiento y cambio de unos intercambiadores por otros. En total, los intercambiadores a ensayar han sido 9 y diseñar un sistema como este, en el cual los elementos se sitúan en un lugar más accesible, ha facilitado enormemente estas tareas.

Las modificaciones en el motor para este sistema de EGR se resumen a continuación:

- Un primer tramo de tubo flexible de unos 15 centímetros, ya que como se puede observar en la imagen 3.1 la válvula se encuentra separada del motor a una cierta distancia y por lo tanto debido a la vibración constante del mismo en las condiciones de ensayo, es posible que se produjera la rotura de algún elemento de este sistema.
- Un segundo tramo en el que se encuentra el intercambiador de calor que refrigera el aire recirculado de nuevo a los cilindros. Este tramo tiene una medida de unos 30 centímetros (intercambiador y bridas incluidas) igual para todos los intercambiadores. Como se puede ver en la imagen, se encuentra localizado lo suficientemente lejos del bloque motor para realizar los cambios de manera ágil y rápida.
- El tercer tramo lo conforma un pequeño trozo recto de tubo, cuya función es la de estabilizar los gases a la salida del intercambiador de calor para que la temperatura y presión medidas sean lo más correctas posibles, y un codo que marca el límite geométrico de la instalación montada.
- El siguiente elemento que encontramos es la válvula de EGR, cuya apertura es controlada por el operador a través del ordenador en función de los requerimientos del punto de operación. A partir de aquí los gases son devueltos al colector de admisión del motor.
- Por último, encontramos el tramo que devuelve los gases al colector de admisión. Este tramo se divide en tres tubos del mismo diámetro con un pequeño flexible en el extremo final que, al igual que el inicio de la instalación, cumple la función de absorber las vibraciones producidas por el motor para evitar la rotura de cualquier elemento. Este tramo está conformado por tres tubos para un mejor reparto de los gases dentro del colector, además de aprovechar los orificios que ya había instalados en el mismo de un proyecto anterior. También encontramos tres válvulas de color rojo situadas en cada uno de estos tubos que, en caso de ser necesario se cerrarían para evitar la introducción de gases desde el sistema de EGR al motor. En nuestro caso se han mantenido abiertas durante todo el proyecto.

- Además de todo esto, se ha instalado también una columna de fasten de aluminio anclada a la bancada, con dos escuadras localizadas en la parte inferior y superior respectivamente del empalme entre el cono de salida del intercambiador de calor y el codo. El objetivo de esto no es otro sino el de asegurar que no se produzca la rotura de ningún elemento de esta instalación, sujetándola en su extremo más alejado del bloque motor.



**Imagen 3.1:** instalación del sistema de EGR

### **3.2.1. Intercambiador de calor**

Los intercambiadores de calor utilizados han sido proporcionados por la empresa VALEO, como ya se ha nombrado anteriormente. Los intercambiadores ensayados hacen un total de 9 unidades, de las cuales 8 de ellas tienen una geometría exterior idéntica en cuanto a dimensiones de bridas de acople, longitud, ancho y grosor. Estas dimensiones son de 190x50x27 mm con dos tomas para el circuito de agua, una de entrada y otra de salida, ambas de 16 mm de diámetro. El diseño interior de los intercambiadores está dividido en 6 celdas. La diferencia principal de estos 8 intercambiadores reside en el tratamiento superficial que han recibido en su proceso de fabricación, además de alguna pequeña diferencia en la geometría interior del circuito de aire. El noveno intercambiador es el único que cambia su geometría exterior con respecto al resto, usando también unas bridas diferentes y con un tamaño mayor.

Para el acople de los intercambiadores y de las bridas en el circuito de EGR se han utilizado unas juntas de papel de grafito (imagen 3.3) cuya función es la de evitar que haya fugas de aire en los puntos de unión de estos elementos.



**Imagen 3.2:** intercambiador de calor y bridas



**Imagen 3.3:** juntas de grafito

### **3.2.2. Válvula de EGR**

La válvula de EGR instalada en el circuito de alta presión, utilizado para la realización de los ensayos es una válvula electrónica. Estas válvulas sustituyen a las válvulas neumáticas, empleadas anteriormente, para tener un mejor control y actuación sobre esta. Tienen una bobina que recibe la corriente a través de la unidad de control del motor (ECU) abriendo o cerrando el paso a los gases que deben recircular. La válvula incorpora sensores y potenciómetros para verificar que el grado de apertura actúa tal cuál dictan los parámetros.

En el caso de este proyecto, se han ensayado los diferentes intercambiadores de calor en dos puntos de funcionamiento, durante los cuales el grado de apertura no ha sido modificado. Por lo tanto el control sobre la actuación y el grado de apertura de la válvula de EGR lo teníamos nosotros desde el ordenador y no hemos dejado que actúe según las órdenes de la ECU. Así, se ha mantenido la válvula con el grado de apertura fijo, necesario para obtener las condiciones deseadas.

### 3.2.3. Circuito de agua de refrigeración

El intercambiador de calor que forma parte de esta instalación está formado por dos circuitos independientes el uno del otro, uno por el que circula agua y el otro por el que pasa el aire recirculado de nuevo a la admisión, como ya se ha explicado con anterioridad. La parte por la que circula el agua es el circuito de refrigeración, que tiene como objetivo enfriar los gases recirculados para introducirlos de nuevo al colector de admisión con la temperatura más baja posible. En este caso, esta agua es la misma que circula por el motor, ya que en comparación con la temperatura del aire que circula por el interior, ésta es lo suficientemente fría como para disminuir la temperatura de este aire unos 150 °C.

Además, este circuito está instalado a contracorriente. Esto significa que el aire recirculado va en un sentido y el agua que lo refrigera circula en sentido opuesto a este. La instalación se ha hecho de esta manera ya que en contracorriente se consigue transferir más energía que en flujo paralelo, ya que la temperatura de salida del agua fría puede acercarse a la mayor temperatura del aire.

### 3.2.4. Instrumentación

La instrumentación utilizada en esta instalación viene dada por la necesidad de medir ciertos parámetros que la empresa encargada de la fabricación y envío de los intercambiadores de calor a estudiar exigía.

Es de gran importancia destacar en este apartado la instrumentación colocada para la medida de la *DeltaP* (diferencia de presión entre la entrada y la salida del intercambiador de calor), debido a que es un parámetro redundante para la caracterización del ensuciamiento producido a lo largo de los ensayos en este elemento del circuito de EGR. Es por ello que, como se explica más adelante, se ha realizado una doble medida de la *DeltaP*: en primer lugar con sensores de presión comúnmente utilizados en otras partes o elementos del motor, y en segundo lugar con un aparato de gran precisión para reafirmar y asegurar la correcta medida tomada con el primero de estos. De esta manera se asegura la obtención de datos muy precisos que nos permiten caracterizar el ensuciamiento de los intercambiadores de calor de manera correcta.

Por otro lado, la medida de la temperatura no se ha instrumentado de manera especial, ya que con los termopares utilizados habitualmente se obtiene una medida lo suficientemente precisa para cubrir las necesidades que se han tenido en este proyecto, en lo que a este parámetro se refiere. De esta manera, la instrumentación realizada ha sido:

- Termopar (medida de temperatura) tanto a la entrada como a la salida del circuito de aire del intercambiador de calor. Este dato es necesario ya que, gracias a estos sensores podemos conocer la eficiencia energética del intercambiador sabiendo cuánto ha sido capaz de enfriar los gases recirculados.

- Sensores de presión situados en la entrada y salida del circuito de aire del intercambiador de calor, respectivamente. Gracias a estos datos se obtiene la evolución del ensuciamiento del intercambiador de calor colocado, ya que cuanto más se vaya ensuciando este, la diferencia de presión entre la entrada y la salida será mayor.

De forma paralela a estos sensores se ha colocado un medidor diferencial de presión, el cual nos da una información más precisa de la tomada originalmente de la diferencia de presión que se da entre la entrada y la salida. Este aparato tiene un rango de medida desde -50 a 50 mbar, que en nuestro caso nos ha sido de gran utilidad debido a que no hemos superado estos valores.

- Termopares a la entrada y salida del circuito de agua de refrigeración, con el fin de conocer a qué temperatura entra el agua de motor para refrigerar el aire del interior del intercambiador y qué valor alcanza una vez sale del mismo.
- Un sensor de presión colocado a la salida del circuito de agua. Solo se ha instalado a la salida ya que el agua tendrá prácticamente la misma presión que a la entrada. En este proyecto, conocer la presión del agua que circula por el intercambiador de calor tiene una gran importancia debido a que el espesor de las celdas del mismo no soporta una diferencia de presión entre el agua y el aire de más de 1 bar. Es por eso que tanto la presión del aire como la del agua tienen que estar controladas constantemente.
- Además de todos estos sensores de presión y de temperatura colocados con el objetivo de tener controlados de manera inmediata todos los parámetros del circuito de EGR, se ha realizado la instalación adicional de un caudalímetro de agua para medir que cantidad circula por este sistema. Este se sitúa a la salida del intercambiador de calor y antes de que el agua sea devuelta de nuevo al circuito del motor. Las unidades con las que se mide este parámetro son litros/hora.

### **3.3. ENSUCIAMIENTO DE ELEMENTOS DEL SISTEMA DE EGR**

Desde la utilización de esta estrategia, el ensuciamiento de los elementos del sistema de EGR en motores diésel es un aspecto conocido por los fabricantes de motores. Bien es cierto que esta técnica favorece la reducción de emisiones de óxidos de nitrógeno, pero también tiene inconvenientes, ya que el gas de escape, utilizado como gas de EGR contiene una cantidad de sustancias de estructura físico-química muy variada, en general sin ningún tipo de tratamiento químico ni de limpieza. Esto desemboca en que, con el paso del tiempo, este sistema se vaya ensuciando progresivamente hasta el punto de poder producir averías en el motor del automóvil a largo plazo. Únicamente se puede hablar de un “filtrado” de este gas

previo a su recirculación en motores en los que se incorpora el EGR de baja presión, donde el gas de escape a recircular se extrae en un punto situado después del filtro de partículas.

Los compuestos del gas de escape recirculado son, por una parte, compuestos gaseosos limpios de partículas, cuyas temperaturas de condensación o sublimación son muy bajas (menores de  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), por lo que siempre se encuentran en estado gaseoso. Estos compuestos son los siguientes:

- Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NO y  $\text{NO}_2$ ).

Estas sustancias no afectan al ensuciamiento de los elementos del motor, dada su naturaleza gaseosa. Por otra parte, en los gases de escape existen otras sustancias de distinta índole y naturaleza que sí contribuyen al ensuciamiento como son:

- Hidrocarburos sin quemar: en general, en motores diésel la cantidad de esta sustancia en el gas de escape es pequeña, aunque varía con la temperatura de operación de los motores. La temperatura de vaporización de estas sustancias se encuentra en el entorno de las temperaturas ambiente, por lo que es posible que se produzca la condensación de las mismas. En estos casos estas sustancias pueden participar en el ensuciamiento de los sistemas de EGR.
- Agua: sustancia natural de la combustión de un hidrocarburo. Se encuentra en estado de vapor a la salida de la válvula de escape, pero puede condensar si el enfriamiento del gas es lo suficientemente alto. El agua no produce ensuciamiento por sí sola, pero participa en la generación de sustancias de ensuciamiento y corrosión cuando se combina con otras sustancias de escape.
- Partículas: se engloban en este concepto un conjunto muy variado de sustancias con base carbonosa sólida y en combinación con otras sustancias producidas en la combustión. Son los responsables máximos del ensuciamiento de los sistemas de EGR, especialmente de intercambiadores y válvulas de EGR, y de muy difícil eliminación una vez depositadas en las paredes de los elementos.

La problemática asociada al ensuciamiento de los sistemas de recirculación de gases de escape se ve altamente incrementada cuando se produce la refrigeración del gas de escape. Cuando la temperatura de estos compuestos se reduce hasta niveles cercanos a los  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  se generan condensados de alta capacidad de ensuciamiento de todos los elementos de la línea de EGR y admisión del motor (intercambiador de calor, válvula de EGR, colectores y válvulas de admisión). Este fenómeno aparece en todos los motores diésel que utilizan el EGR como estrategia para reducir las emisiones de  $\text{NO}_x$ .

## 4. ENSAYOS Y RESULTADOS

### 4.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo del presente documento se va a explicar detalladamente la puesta en funcionamiento de la sala una vez se han realizado todas las adaptaciones necesarias, explicadas anteriormente, además de la validación de la instalación del sistema de EGR mediante ensayos experimentales.

Para la validación de la instalación que caracteriza el ensuciamiento de intercambiadores de calor del sistema de EGR se ha realizado el estudio de dos de ellos, los cuales han sido ensayados en dos puntos de funcionamiento distintos, según las indicaciones de la empresa que los suministraba.

A continuación, se presentará tanto la rutina de ensayos que se ha seguido en este proyecto, como los puntos de funcionamiento (régimen de giro, par, pedal...) estudiados, así como los resultados obtenidos.

### 4.2. RUTINA DE ENSAYOS

Antes del arranque del motor para la realización de un ensayo es necesaria la puesta en marcha de varios elementos de la sala y la verificación de que todos los elementos se encuentran en correcto funcionamiento, para asegurar que no se va a producir ninguna situación inesperada o de peligro tanto para la sala y toda la instalación de su interior, como para los técnicos que la controlan y las personas de alrededor.

Así, la rutina previa a un ensayo que se ha seguido ha sido la siguiente:

<b>Sala</b>	
Comprobación niveles de aceite y agua del motor	*
Arranque alimentación armario de control de sala	*
Puesta en marcha armario de control de sala	*
Puesta en marcha armario de acondicionador de combustible	*
Encendido del opacímetro AVL415	*
Encendido de la alimentación sistemas electrónicos de control	*
<b>Sistema de ventilación, abastecimiento de agua y combustible</b>	
Suministro de agua a las salas de ensayo	*
Extracción de la sala	*
Ventilación de la sala	*
Ventilación forzada del altillo	*
Agua de la sala	*

Combustible de la sala	*
<b>HORIBA</b>	
Comprobación de filtros	*
Calentamiento de las líneas	*
Purgue de la línea de la sala	*
Calibración	*
<b>STARS</b>	
Arranque ordenadores	*
Arranque programa STARS	*
Selección proyecto con el que vamos a trabajar	*
Activar control sobre freno, batería y combustible	*
<b>INCA</b>	
Selección proyecto	*
Control sobre válvulas de EGR	*
Resetear errores	*
Activación de la "Working Page" e inicio test	*
<b>ARRANQUE MOTOR</b>	

Una vez se han realizado todas estas comprobaciones y puesta en funcionamiento de los elementos indicados, se puede arrancar el motor para su calentamiento previo a la realización de un ensayo. Esta rutina es necesario realizarla cada día antes de la puesta en marcha del motor por primera vez. Además de todo esto es recomendable realizar una confirmación visual de que todos los elementos, sensores, bridas de sujeción... del motor se encuentran en buen estado, así como fugas de aire o agua que pueda haber.

### 4.3. PUNTOS DE FUNCIONAMIENTO

Para la realización de los ensayos con intercambiadores de calor, estos han sido estudiados en dos puntos de funcionamiento diferentes, cada uno de ellos con un régimen de giro, par, pedal y apertura de válvula de EGR diferentes.

Primeramente, la empresa VALEO nos suministró un intercambiador nuevo calificado como "intercambiador de pruebas", el cual fue utilizado para buscar los puntos de funcionamiento especificados por esta empresa. Como ya se ha nombrado anteriormente, los puntos en los que se ha trabajado han sido dos, uno de ellos con una alta concentración de hidrocarburos (altos HC) y el otro con altos humos (alta opacidad). Para ello las especificaciones proporcionadas por VALEO y a las que hubo que ceñirse para encontrar estos puntos son:

- Altos HC:
  - Rango de HC = 300-400 ppm
  - Opacidad en torno a 1 FSN

- Alta opacidad:
  - Rango de opacidad = 4-5 FSN
  - HC en torno a 100 ppm

Gasto de EGR = 6 g/s y temperatura agua de refrigeración = 80 °C, ambos parámetros comunes para los dos puntos de funcionamiento.

Una vez conociendo los requerimientos de la empresa y con el intercambiador de calor de pruebas instalado, llegó el momento de buscar en qué puntos de funcionamiento del motor se daban las condiciones especificadas. Tras numerosas pruebas se establecieron las siguientes condiciones de trabajo del motor que cumplían los requerimientos especificados:

- Punto de altos HC:
  - Régimen de giro del motor: 2500 rpm
  - Pedal = 22 %
  - Apertura válvula de EGR: 40 %

Con estos parámetros de motor, los resultados obtenidos han sido:

- HC = 349 ppm
- Opacidad = 1,18 FSN
- Gasto EGR = 6,83 g/s
- Tª coolant = 81 °C

Como se puede observar, en este punto de funcionamiento se cumplen las especificaciones y por tanto es válido para los ensayos.

- Punto de alta opacidad:
  - Régimen de giro del motor = 2050 rpm
  - Pedal = 40 %
  - Apertura válvula de EGR: 42 %
  - Turbina de geometría variable: fija al 52 %

Los resultados obtenidos con estos parámetros son:

- Opacidad = 4,83 FSN
- HC = 86 ppm
- Gasto EGR = 6,37 g/s
- Tª coolant = 81 °C

En este punto se puede apreciar que se ha añadido un parámetro más para conseguir ceñirnos a las especificaciones proporcionadas. Este parámetro es el grado de apertura de la turbina de geometría variable (TGV). La TGV recibe ese nombre debido a que se puede modificar el grado de apertura de los álabes de la misma según las necesidades de régimen de giro de la turbina o de la expansión de gases que se quiera realizar, todo ello controlado por la ECU del motor. En este caso se ha tenido que fijar la posición de la turbina debido a que al acercarnos a una lambda tan baja en el punto de alta opacidad, la ECU del motor lo detectaba y modificaba la posición de la misma. Esto bajaba la potencia desarrollada en la turbina y a su vez el aire que entraba al motor,

que hacía que se diera un comportamiento inestable. Por ello es que se ha fijado la posición, actuando nosotros sobre la turbina en lugar de ser regulada por la ECU.

Una vez encontrados estos puntos y siendo posteriormente verificados por VALEO, se desmontó el intercambiador de calor de pruebas, instalando a continuación otro nuevo dando así comienzo a los ensayos oficiales.

#### **4.4. RESULTADOS OBTENIDOS**

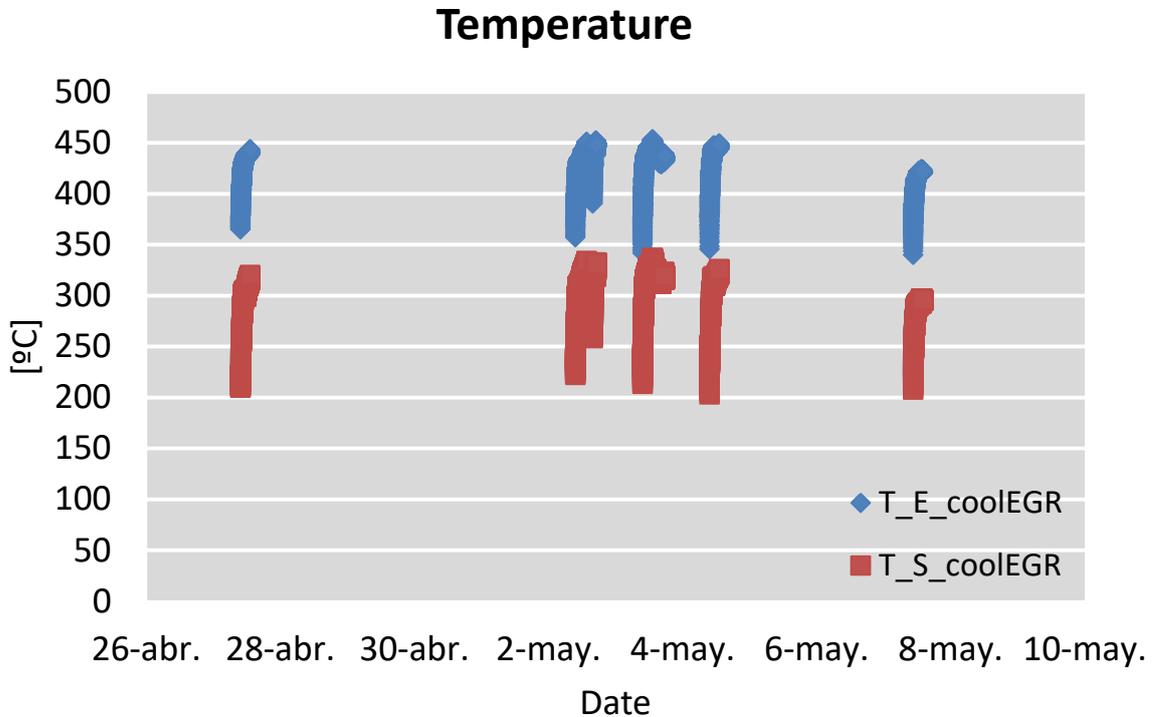
En este apartado, se presentan los resultados que se han obtenido tras el ensayo de los intercambiadores de calor durante 24 horas (no continuas), mediante gráficas que representan la evolución de los parámetros más importantes a analizar, tanto en el punto de altos HC como en el de alta opacidad. Además de un análisis de estos resultados que explicarán las características de estos aparatos.

Los resultados que se van a presentar a continuación, tanto en el punto de alta opacidad como en el de altos HC, respectivamente, se han obtenido con el ensayo de un intercambiador de calor calificado como “blanco”. Esto quiere decir que no se le ha realizado ningún tratamiento superficial que lo dote de más rugosidad o de una textura especial. Estos son los intercambiadores de calor con los que se han comenzado los ensayos, ya que los resultados obtenidos sirven como punto de partida para, a partir de aquí, evaluar la mejora o empeora del comportamiento del resto de intercambiadores dotados de tratamientos superficiales.

Cabe destacar que durante estos ensayos tanto los datos del aparato HORIBA encargado de medir contaminantes (HC y EGR en este caso) como los de opacidad han sido tomados cada media hora de ensayos, a diferencia del resto de parámetros como temperaturas, presiones, régimen de giro... Eso se debe a que, por un lado, el opacímetro no graba de forma automática los datos y por lo tanto se han tenido que apuntar en una libreta aparte para su posterior procesado en Excel para la elaboración de las gráficas. Y por otro lado, el HORIBA no puede estar midiendo de manera continuada (máximo 30 minutos) ya que se corre el riesgo de estropearse.

#### 4.4.1. Punto de alta opacidad

- Temperatura del aire del intercambiador de EGR



**Gráfico 4.1:** temperatura del aire

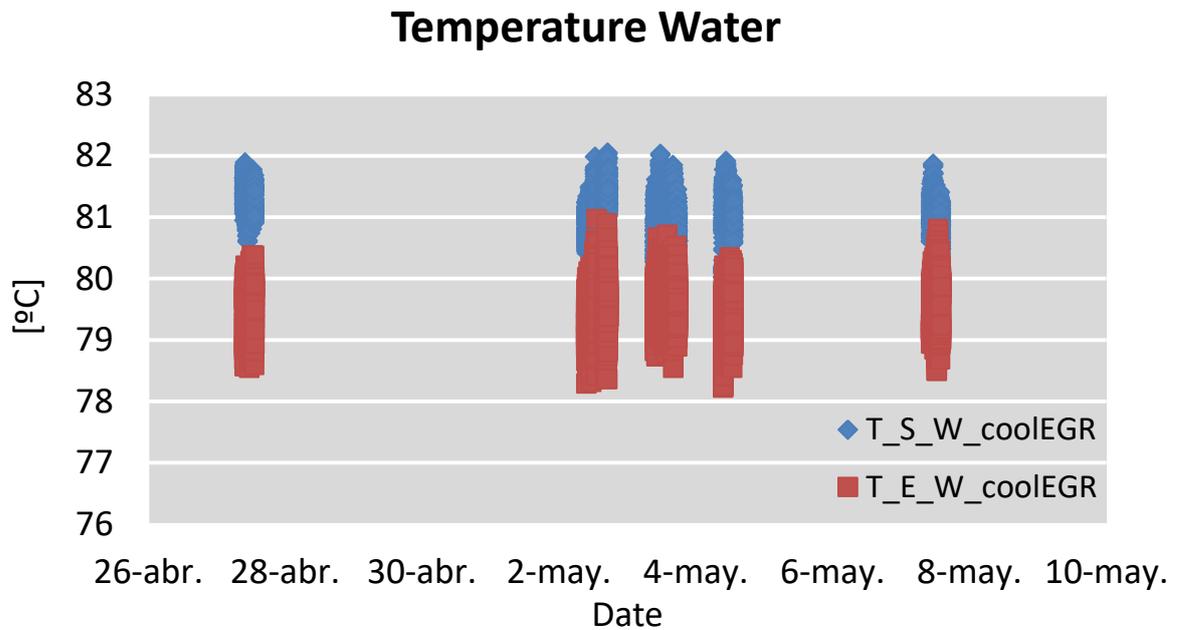
En este primer gráfico se muestra la evolución de las temperaturas tanto de la entrada como de la salida del aire en el interior del intercambiador de calor. En color azul, identificamos la temperatura a la entrada de este, obviamente con una mayor temperatura que a la salida, representada con el color rojo.

Como se puede observar, ambas temperaturas presentan la misma evolución. Al inicio del ensayo la temperatura del aire es más baja, ya que el motor no se encuentra completamente caliente. Cuando el motor se calienta la temperatura se comporta de manera más o menos estable, ya que en el ensayo el punto de trabajo es siempre el mismo. Las temperaturas medias se encuentran en torno a 440 °C a la entrada y en 320 °C a la salida, en este punto de alta opacidad.

Si nos fijamos por ejemplo en el día 2 de mayo, observamos que la temperatura evoluciona de manera habitual, más baja al principio y luego se estabiliza, pero parece que luego vuelve a bajar hasta más o menos 250 °C y de nuevo vuelve a subir hasta un punto estable. Eso es así debido a que los ensayos de un día se dividían entre la mañana y la tarde, en los que el motor se paraba un par de horas entre estos ensayos y por lo tanto al volverlo a

arrancar por la tarde, el motor debía de volver a calentarse hasta alcanzar la temperatura de trabajo apropiada.

- Temperatura del agua de refrigeración

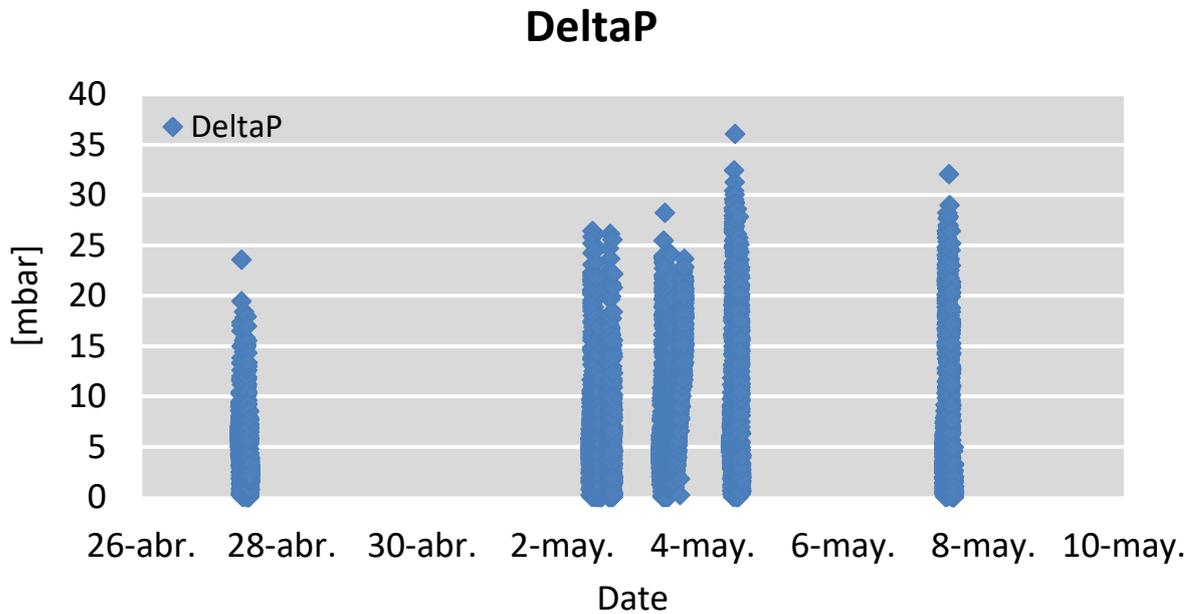


**Gráfico 4.2:** temperatura del agua de refrigeración

En este gráfico se representa la temperatura del agua que circula por el intercambiador de calor con el objetivo de refrigerar el aire recirculado de nuevo al motor. En color rojo se identifica la temperatura de entrada al intercambiador de calor y en color azul la de salida.

Como ya se ha dicho anteriormente, este agua de refrigeración proviene del motor, por un bypass a través del cual le llega al intercambiador de calor, que una vez lo atraviesa se devuelve de nuevo al motor. Observando el gráfico podemos ver que la temperatura del agua que entra en el intercambiador de calor se encuentra en torno a unos 79,5 °C y la de salida 81,5 °C. Esta temperatura es la adecuada para enfriar los gases y como se puede apreciar al atravesar el aparato, el agua no se calienta en exceso, lo que quiere decir que la cesión de calor por parte del aire hacia el agua es lo suficiente como para enfriar los gases pero no como para calentar el agua.

- Diferencia de presión



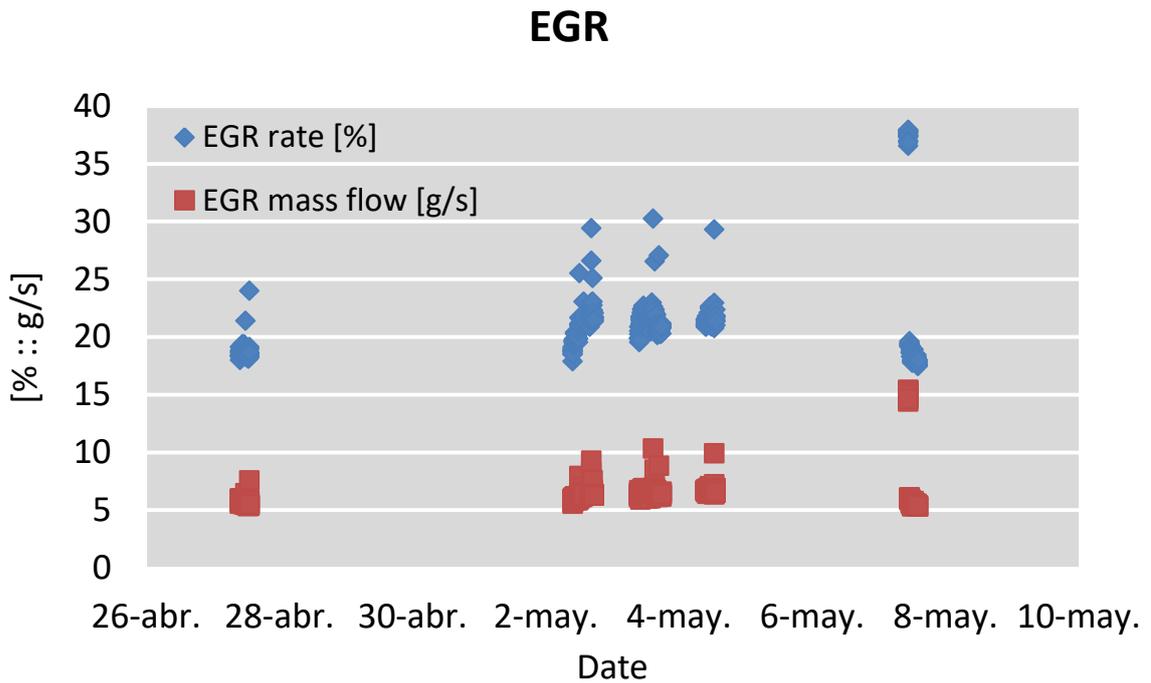
**Gráfico 4.3:** diferencia de presión entrada/salida intercambiador

Este tercer gráfico hace referencia a la diferencia de presión que existe entre la entrada y la salida del circuito de aire del intercambiador de calor. Es un factor a tener en cuenta ya que representa la evolución del ensuciamiento en el interior del intercambiador a lo largo de los ensayos, debiendo aumentar así esta diferencia de presión cuanto más sucio esté el aparato.

Se puede apreciar una cierta evolución de esta diferencia de presión a lo largo de los días, pero como se observa en el eje de ordenadas la escala de presión es muy baja, en milibares (mbar) y con una media en torno a 15. Esta baja diferencia de presión, se puede deber también a que el intercambiador de calor tiene un tamaño reducido y por ello, además de que no se ensucia demasiado al no tener rugosidades en sus paredes interiores, la diferencia de presión no es muy grande.

Con todo esto, los valores se encuentran dentro de lo esperado, en un rango entre 0 y 35 mbar y con un aumento paulatino de esta diferencia de presión a medida que se sucedían las horas de ensayo.

- Gasto de EGR

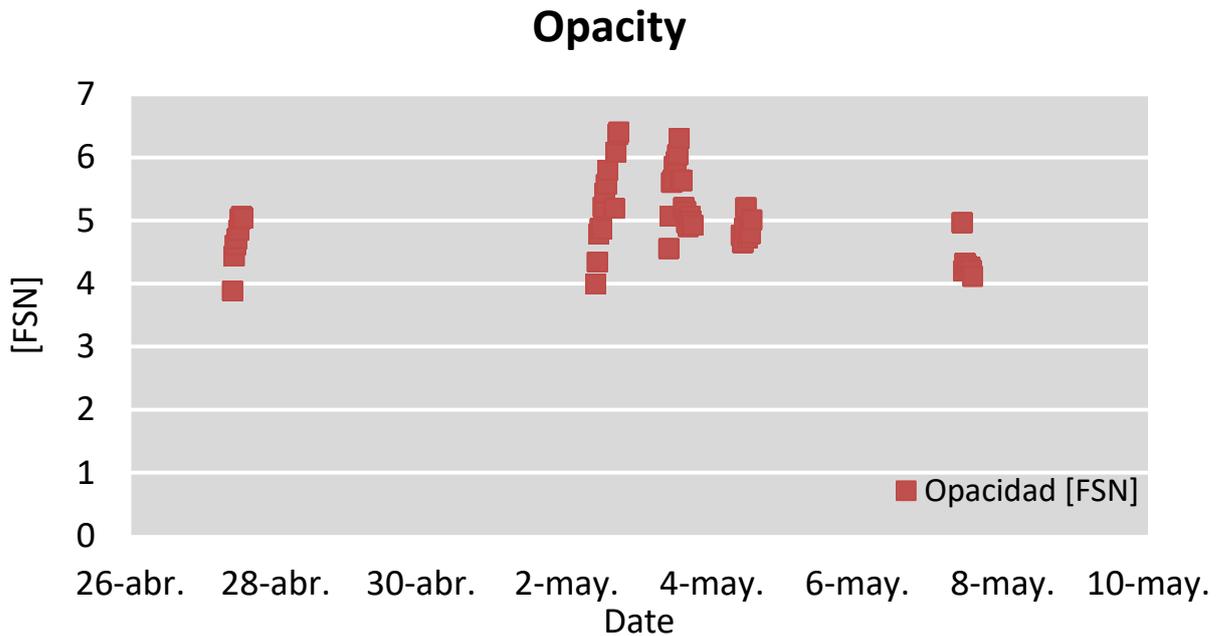


**Gráfico 4.4:** gasto de EGR

En este gráfico se representa el gasto de EGR obtenido en los ensayos, otra de las condiciones a tener en cuenta, impuestas por la empresa encargada de la fabricación de los aparatos estudiados. En color rojo se representa este gasto en unidades de gramos por segundo (g/s) y en color azul el porcentaje de EGR correspondiente al total de aire admitido por el motor.

Como se puede observar este gasto de EGR ronda los 6 g/s, cumpliendo con las especificaciones impuestas. Este gasto se ha regulado mediante la apertura de la válvula de recirculación de gases de escape y la fijación de la turbina de geometría variable (TGV), con todo ello el porcentaje de EGR que se ha efectuado corresponde a un 23 % aproximadamente del total de caudal de aire admitido por el motor.

- Opacidad

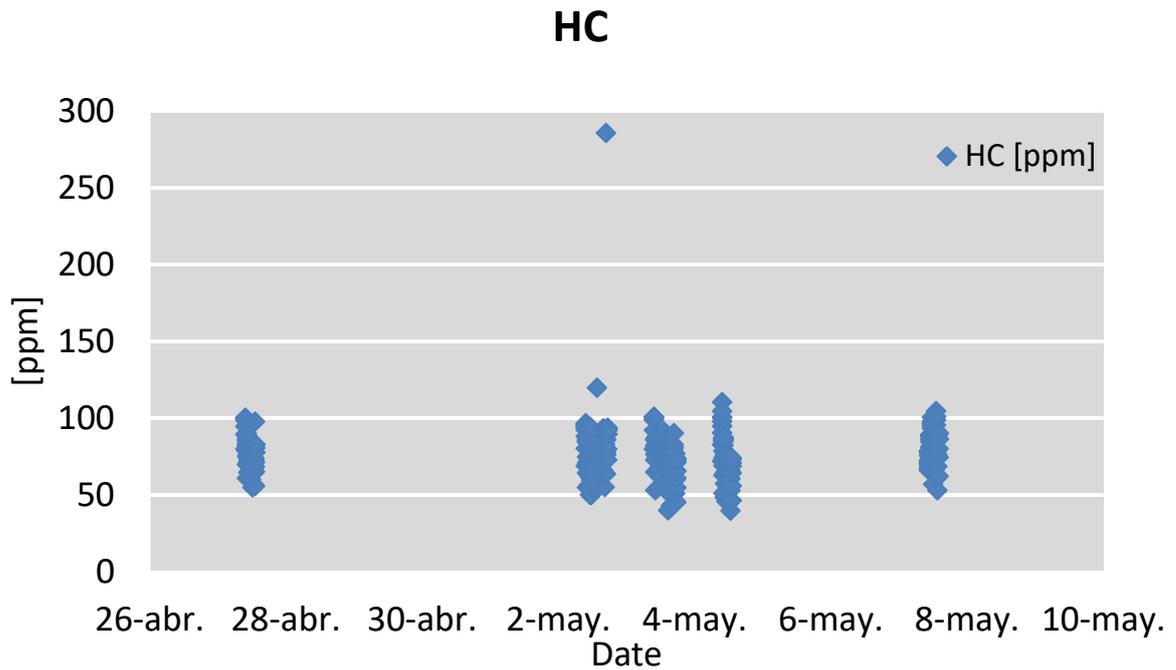


**Gráfico 4.5: Opacidad**

El gráfico que aquí se presenta hace referencia a la opacidad medida en el punto de trabajo especificado (alta opacidad) que, según las indicaciones, debe de estar comprendida entre 4-5 FSN. Representado en color rojo, se presentan las opacidades medidas a lo largo de los ensayos hasta cumplir las 24 horas previstas.

A la vista de esta representación, podemos decir que se ha cumplido con lo establecido, situando la opacidad en torno al rango mencionado anteriormente. Aunque se puede apreciar que en algunos de los ensayos efectuados, esta opacidad ha llegado a alcanzar valores de 6 FSN. Esto no es alarmante, ya que el promedio de las opacidades medidas, que es lo que mayor relevancia tiene, sí se encuentra dentro del rango establecido.

- Hidrocarburos sin quemar

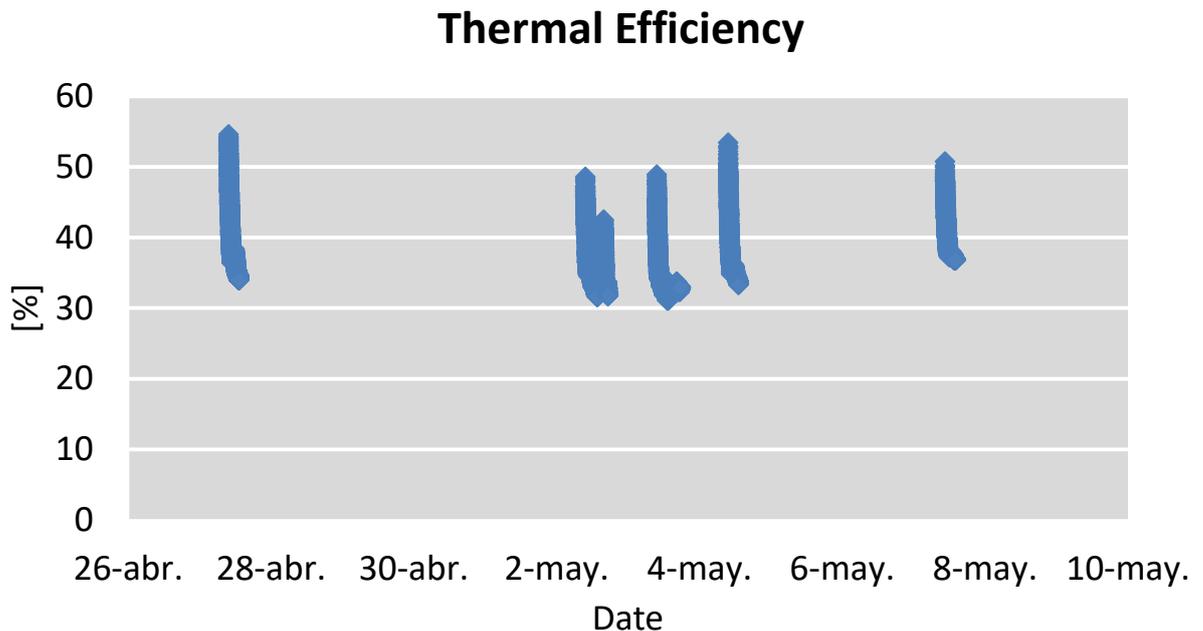


**Gráfico 4.6:** Hidrocarburos (HC)

Otra de las variables a tener en cuenta, han sido los hidrocarburos contenidos en los gases de escape que expulsaba el motor en este punto de funcionamiento. En este caso el valor de estos HC ha sido pequeño, tal y como se buscaba, con un máximo de 100 ppm aproximadamente.

Representado en este gráfico de dispersión, en color azul, se observan los hidrocarburos de cada día que se ha realizado un ensayo, con un mínimo de 50 ppm hasta 100 ppm. Se observa algún valor alejado de la zona media, como el punto que indica casi 300 ppm de hidrocarburos del día 2 de mayo, debido posiblemente a un error en la medida por parte del técnico al cargo de la sala o del mismo aparato de medida (HORIBA), pero en cualquier caso, sin ninguna relevancia para los resultados, ya que al ser un valor tan alejado de la media no se tiene en cuenta.

- **Eficiencia térmica**



**Gráfico 4.7:** eficiencia térmica

La eficiencia térmica del intercambiador de calor es uno de los datos que mejor lo define, ya que determina de una manera objetiva la capacidad que tiene el aparato para cumplir la función para la que se ha diseñado, refrigerar un fluido que circula en su interior. Por ello, aquí se presenta el gráfico de la eficiencia térmica del intercambiador ensayado en el punto de alta opacidad.

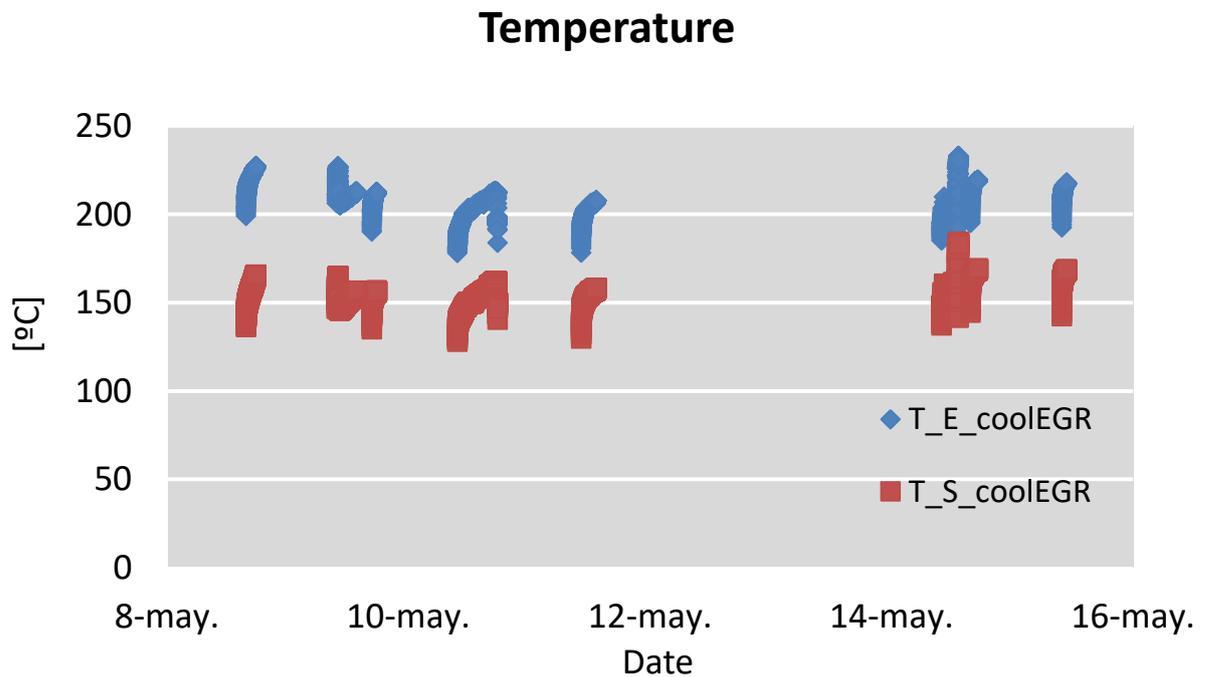
El aspecto más importante a tener en cuenta al observar este gráfico es que, como se puede apreciar, cada día al comienzo de un ensayo la eficiencia térmica que posee este intercambiador de calor es de un 50-55 %, mientras que al final de los ensayos, normalmente tras unas 3 o 4 horas de funcionamiento, la eficiencia de este se va reduciendo paulatinamente hasta un 33 % aproximadamente, manteniéndose estable en ese punto hasta que se para el motor.

Tras haber valorado este comportamiento, se ha llegado a la siguiente conclusión: durante un ensayo de alta opacidad, en el que se produce una formación de partículas y humos considerable, el intercambiador de calor se va ensuciando poco a poco, depositándose partículas en las paredes interiores que hacen que pierda eficiencia a medida que transcurre el ensayo. La explicación de que a la mañana siguiente cuando se da comienzo a otro ensayo la eficiencia vuelva a ser similar a la inicial del día anterior y no a la final, es porque parte de las partículas adheridas a las paredes del intercambiador del día anterior son expulsadas debido a que se encuentran situadas de manera superficial, obteniendo así una eficiencia superior que con la que se finalizó el día anterior.

Aún con todo esto, una eficiencia de un 33 % es un valor bastante bajo para un intercambiador de calor común, pero no debemos olvidar que este es un prototipo y de un tamaño reducido, lo cual reduce de manera considerable su eficiencia.

#### 4.4.2. Punto de altos HC

- Temperatura del aire del intercambiador de EGR



**Gráfico 4.8:** temperatura del aire

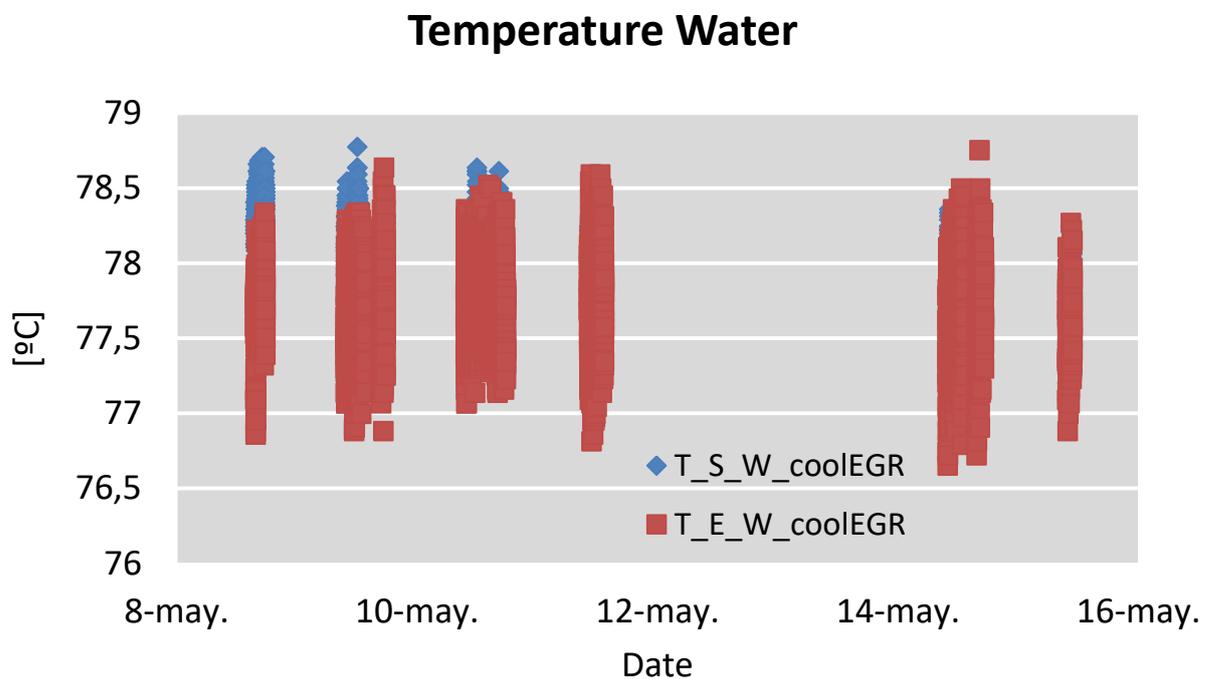
De la misma manera que en el punto de alta opacidad, aquí se presenta la evolución de la temperatura del aire tanto a la entrada (azul) como a la salida (rojo) del intercambiador de calor en el punto de altos HC.

Atendiendo a la gráfica y comparándola con la correspondiente al punto de alta opacidad, podemos observar que las temperaturas, tanto de entrada como de salida del intercambiador de calor, son más bajas en este punto de altos HC que en el de alta opacidad. En torno a 200 °C a la entrada en este punto, frente a 400 °C en el punto de alta opacidad y 150 °C a la salida frente a 250 °C. Que exista esta diferencia de temperaturas entre dos puntos de operación diferentes se debe principalmente al porcentaje de carga de pedal, y como consecuencia el par motor. En los ensayos en alta opacidad, el porcentaje de pedal es de 40 %, lo que suministra un par motor de alrededor de 103 Nm. Sin embargo en los ensayos de altos HC este porcentaje de pedal se reducía hasta casi la mitad, 22 %, tal como se indica en el punto

4.3 del presente documento. Al tener más porcentaje de carga y con ello más par, esto repercute en un incremento de la temperatura del aire tanto en el intercambiador de calor como en otros elementos como pueden ser la turbina y el sistema de escape.

Como consecuencia de todo esto, y como es lógico, el intercambiador calor no reduce tanto la temperatura del aire como en el otro caso, ya que la diferencia de temperaturas entre el agua y el aire es menor.

- **Temperatura del agua de refrigeración**



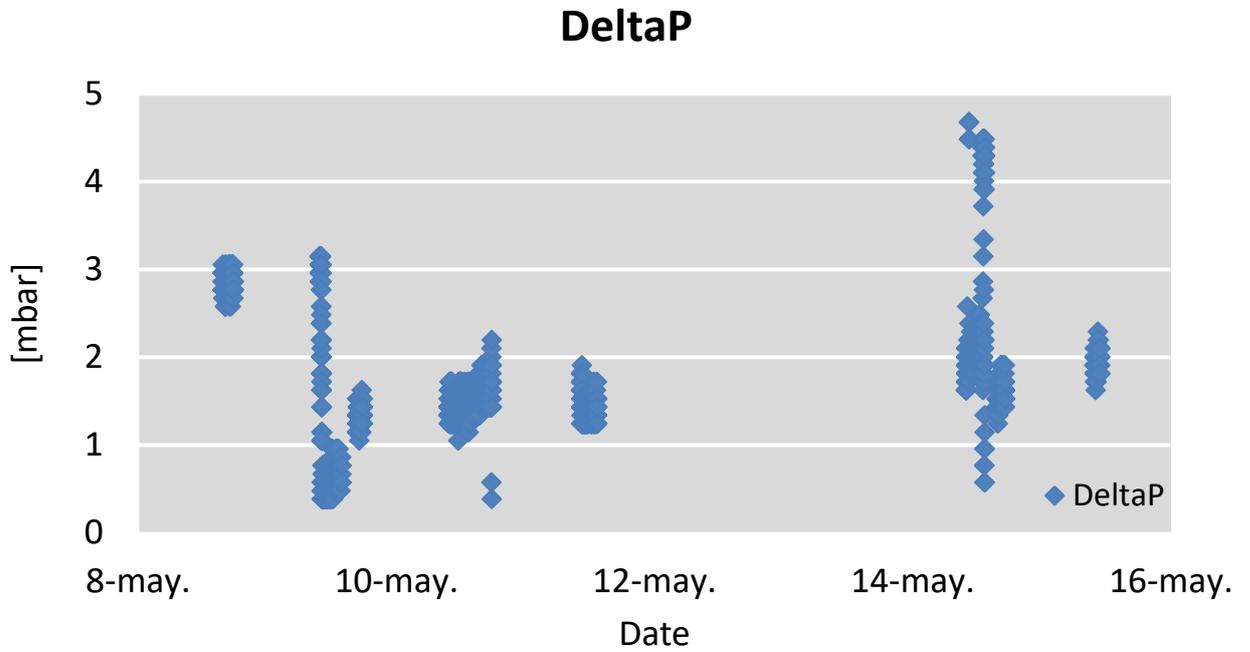
**Gráfico 4.9:** temperatura del agua de refrigeración

Como se puede observar en este gráfico representativo de la temperatura de refrigeración del intercambiador de calor, no existe apenas diferencia entre la de entrada y la de salida, debido a lo explicado en el punto anterior. Al tener una diferencia de temperaturas menor entre el aire y el agua, la transferencia de calor entre los dos fluidos también se ve disminuida, siendo muy similares ambas.

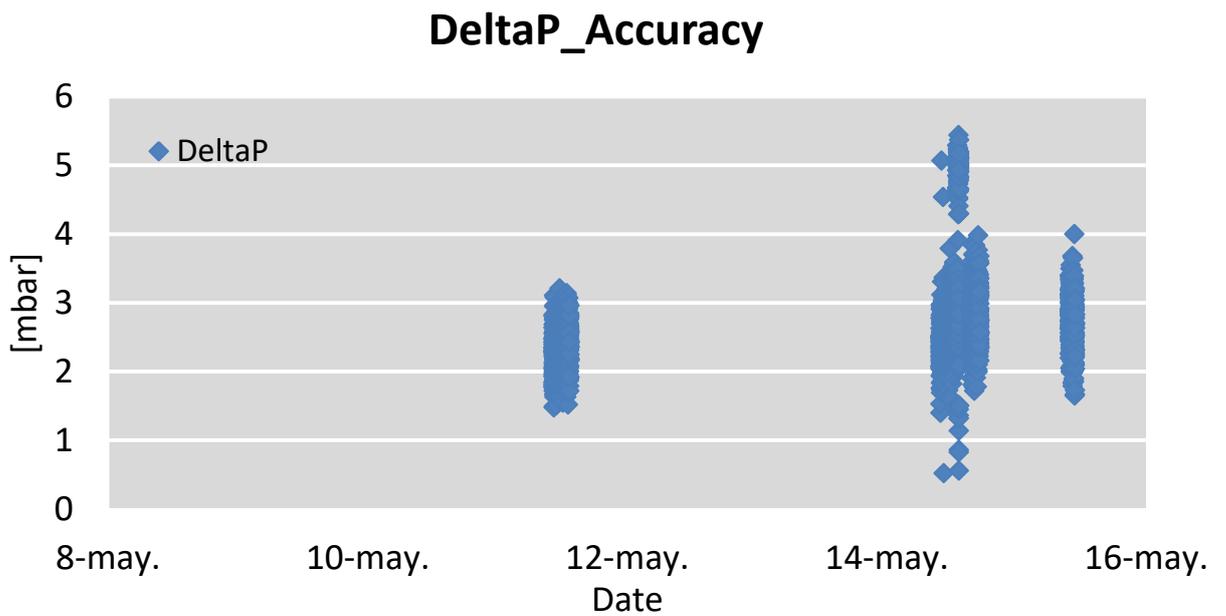
A pesar de esto, se sigue apreciando que el intercambiador de calor cumple la función para la que está diseñado, enfriando el aire que circula por su interior, y como consecuencia se observa un ligero incremento de la temperatura del agua debido a la transferencia de calor producida.

En color rojo queda representada la temperatura de entrada del agua al intercambiador de calor y en azul la de salida.

- Diferencia de presión



*Gráfico 4.10: diferencia de presión entrada/salida intercambiador*



*Gráfico 4.11: diferencia de presión entrada/salida intercambiador con mayor precisión*

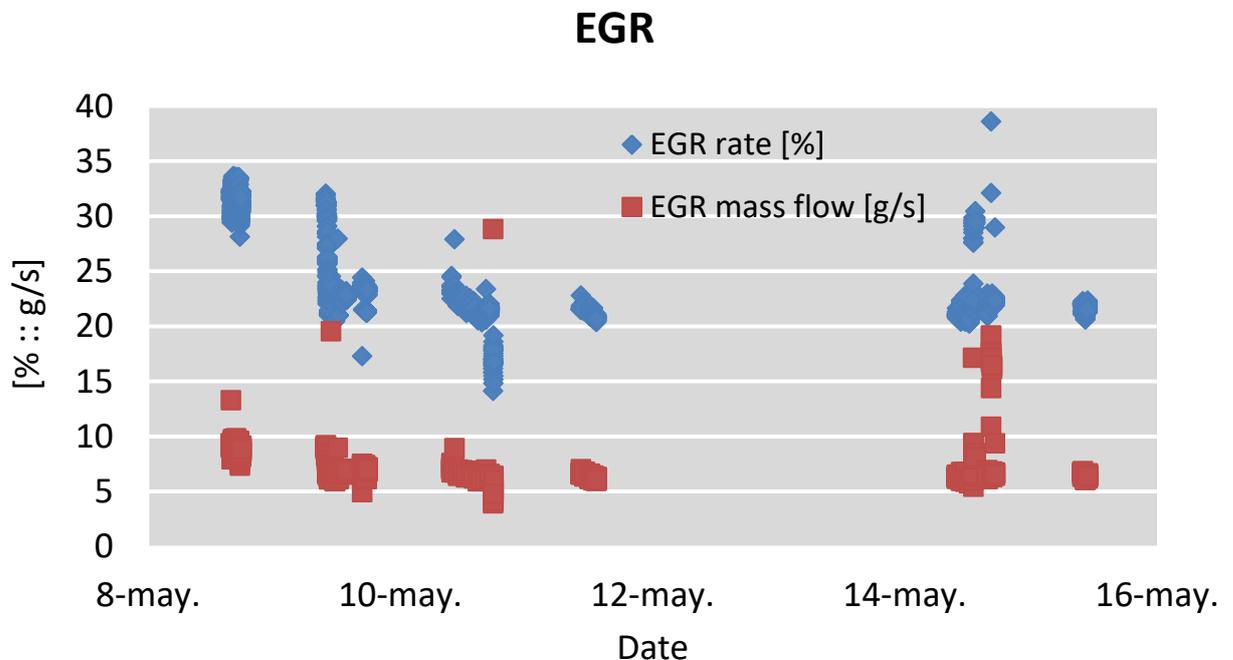
Estos dos gráficos que aquí se representan corresponden a la diferencia de presión entre la entrada y la salida del aire en el intercambiador de calor.

Ambas gráficas representan este parámetro, que como podemos observar en ellas los valores que representan son prácticamente idénticos. La diferencia principal de estas dos gráficas ha sido la forma de medir esta presión. La primera de ellas ha sido medida con un sensor de presión habitual, como el que se instala en los demás elementos del motor, formado por un swajelock roscado en el punto donde se quiere medir la presión y unido a él un tubo de teflón de 8 mm de diámetro. La precisión de esta medida es relativamente buena, ya que el margen de error es muy pequeño.

Sin embargo, para la obtención de la segunda gráfica se ha instalado un aparato aparte, explicado en el punto 3.2.4 que mide esta diferencia de presión de manera mucho más exacta. Como se puede observar en la gráfica, este aparato ha sido instalado a partir del día 11 de mayo y por ello no se ha utilizado durante los ensayos anteriores a esa fecha.

Si comparamos estas gráficas con la correspondiente en el punto de alta opacidad, podemos observar que la DeltaP de este punto de altos HC es menor que en el otro, moviéndose en este caso en un rango de unos 2 mbar. Esta es otra de las consecuencias que se deben al porcentaje de carga del pedal y del par motor.

- **Gasto de EGR**



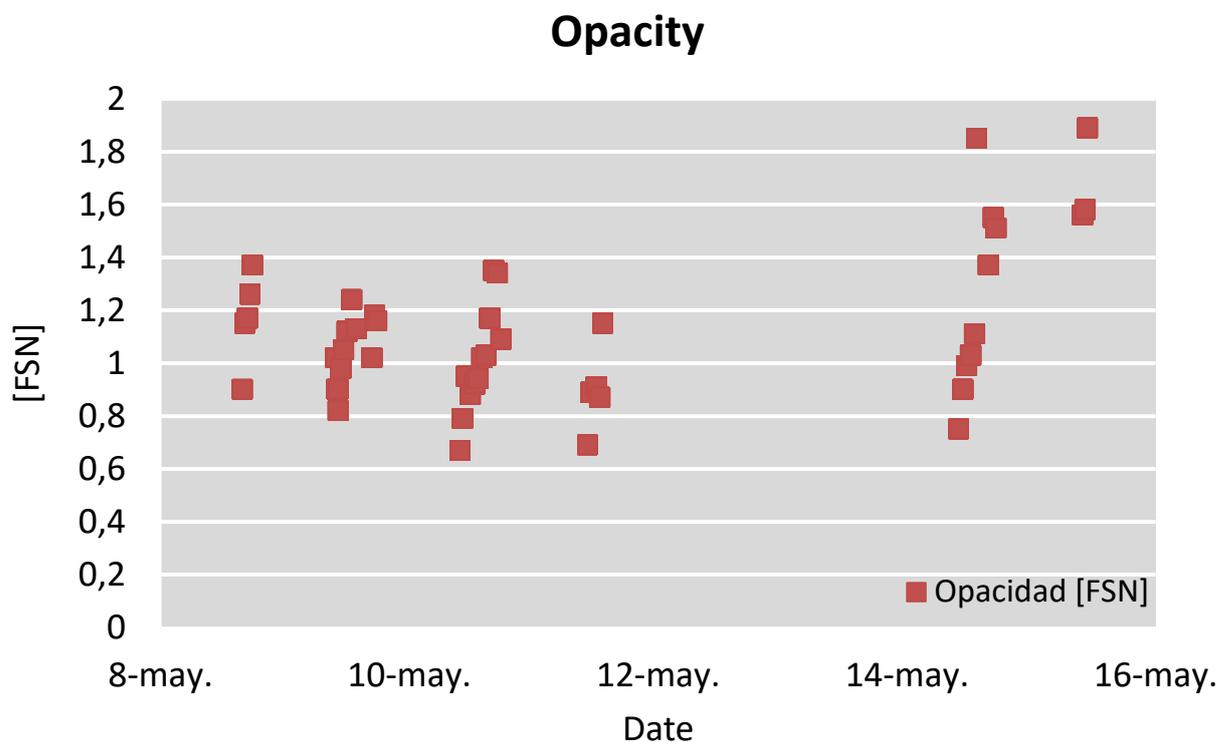
**Gráfico 4.12: gasto de EGR**

Como se puede apreciar en el gráfico, este representa el gasto de EGR obtenido de los ensayos a altos HC. La gráfica representa este resultado tanto en porcentaje (azul) como en gramos/segundo (rojo), al igual que en el punto de trabajo visto anteriormente.

En este punto, el gasto también debe ser en torno a 6 g/s y como se puede observar este parámetro durante los ensayos se encuentra en puntos cercanos a este, por tanto es válido. De la misma manera, este gasto de EGR corresponde a un 25% del aire total que recibe el motor para realizar la combustión.

En el gráfico puede verse que no todos los datos obtenidos de gasto EGR son de un valor de 6 g/s, debido a que el motor con el paso del tiempo y de las horas de ensayo va ensuciando tanto el intercambiador de calor instalado como otros muchos elementos del mismo. Debido a esto durante los ensayos se deben ir haciendo pequeños ajustes en cuanto a apertura de válvula, TGV, etc. Para conseguir mantener determinados parámetros como es el gasto de EGR cerca del límite establecido. No obstante tras las 24 horas de ensayos, el objetivo es conseguir una media lo más cercana posible a lo deseado.

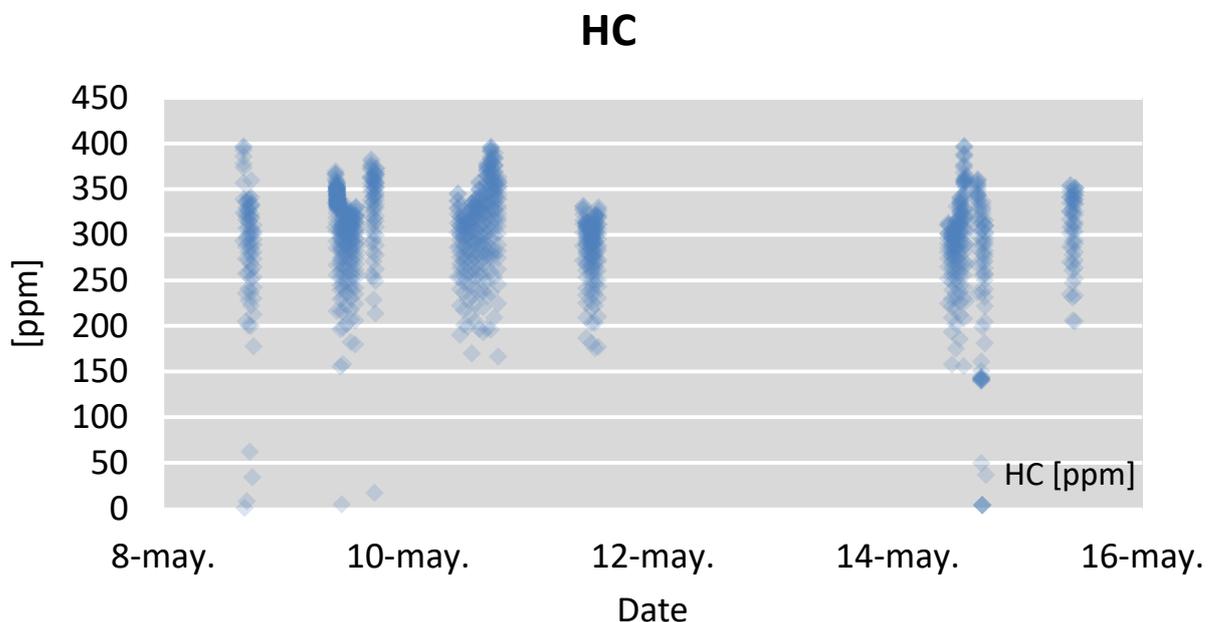
- **Opacidad**



**Gráfico 4.13: Opacidad**

Gráfico cuya representación hace referencia a la opacidad obtenida en estos ensayos de altos hidrocarburos (HC). En el caso de este punto, como se ha indicado en las especificaciones anteriormente, el valor de la opacidad debe de estar en torno a 1 FSN. Si observamos el gráfico se puede ver que se ha alcanzado el objetivo, siendo el valor medio obtenido cercano a 1, a pesar de ciertos puntos que apreciablemente tienen algo de dispersión que, en cualquier caso, no ha sido significativo ya que representan un porcentaje muy bajo con respecto al total de muestras tomadas.

- **Hidrocarburos sin quemar**



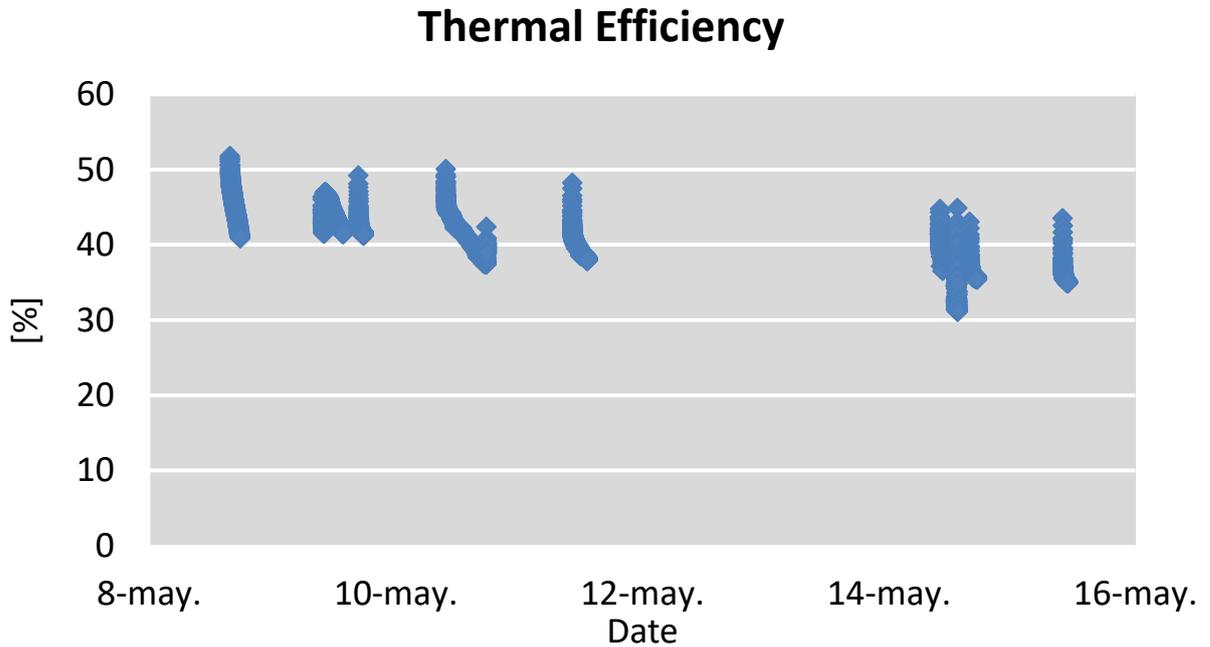
**Gráfico 4.14:** hidrocarburos

En el gráfico que aquí se muestra están representados los hidrocarburos procedentes de las sustancias contaminantes del motor medidos durante los días de ensayo en partes por millón (ppm), en color azul.

Al ser el punto de altos HC, este valor tiene que estar entre 300 y 400 ppm, cosa que se ha logrado, ya que como se puede ver la mayoría de los datos adquiridos se encuentran dentro de este rango de medidas.

Se debe tener en cuenta que tanto las medidas de opacidad como del HORIBA (medidor de sustancias contaminantes) se han tomado cada 30 minutos de ensayo, a diferencia del resto de medidas obtenidas automáticamente por el programa STARS, por tanto se cuenta con un número de datos menor a la hora del análisis de estos.

- Eficiencia térmica



**Gráfico 4.15:** eficiencia térmica

Como ya se ha dicho anteriormente en el punto de alta opacidad, la eficiencia térmica es un parámetro muy importante a la hora de caracterizar un intercambiador de calor. Aquí se representa esta eficiencia térmica para el punto de altos HC.

La evolución de este parámetro a lo largo de los ensayos es la misma que en el punto anterior, con más eficiencia al inicio del ensayo y menos al final, estabilizándose en un punto cercano al 35%, debido a la acumulación de partículas en el conducto de EGR.

De la misma manera la eficiencia media obtenida es prácticamente la misma, un 35,66% en el punto de alta opacidad frente a un 35,03% en este punto de altos HC. Se mantiene la baja eficiencia ya que es un intercambiador de calor idéntico.

#### 4.5. INCIDENCIAS Y RESOLUCIÓN

A lo largo de los ensayos de este proyecto se han sucedido algunos problemas o incidencias en el funcionamiento del motor o de alguno de sus elementos. Incidencias que han repercutido en la continuidad de los ensayos, habiendo sido parados estos para solucionar los problemas de la manera más rápida y eficaz posible.

Al inicio de los ensayos todo transcurrió con normalidad durante las primeras 48 horas, hasta que se observó que la válvula de EGR comenzó a comportarse de manera inestable. Para solucionar este problema se pensó en retirarla y limpiarla, ya que este problema de mal funcionamiento se podía deber a un atasco por la suciedad de los gases de escape. Al intentar extraerla para realizar la limpieza de la válvula, ésta estaba atascada y se rompió. Así, se decidió cambiarla completamente, asegurando así que con una válvula nueva no se volvería a repetir este fenómeno de inestabilidad.

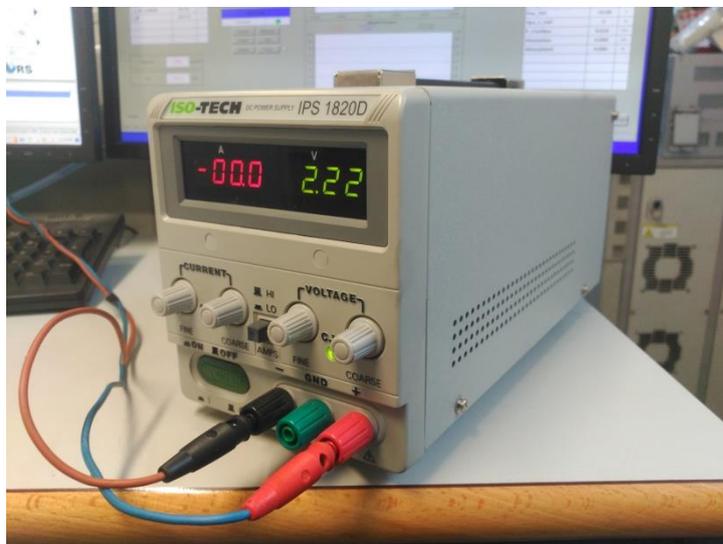
Una vez solucionado este primer problema se continuó con los ensayos con normalidad, hasta que tras algunas horas funcionamiento más, volvieron a aparecer pequeñas inestabilidades en la válvula de EGR una vez más. Problemas que en un principio no repercutían en los ensayos, ya que la válvula sufría pequeñas inestabilidades de manera poco habitual, pero rápidamente volvía a su correcto funcionamiento. Pero poco a poco estas inestabilidades fueron a más hasta causar el parón de los ensayos debido a que la válvula de EGR abría y cerraba completamente de manera muy rápida, lo que provocaba cambios en la admisión de aire muy bruscos que podrían producir la rotura de algún elemento del motor. En este momento se pensó que el problema no debía ser de la válvula, sino del cableado de la ECU, debiendo encontrarse algún cable en mal estado que provocara que la señal no llegase a la válvula de manera adecuada. Se procedió entonces a revisar el cableado del motor desde esta válvula de EGR hasta la ECU. Al no observarse ningún desperfecto en el cableado se procedió a buscar el error por otro lado, percatándonos de que en la válvula de EGR de baja presión había un tubo parcialmente roto por donde podía aspirar aire directo a la admisión. Como ya se ha dicho anteriormente esta válvula estaba anulada manualmente, colocando una chapa a la entrada del tubo, pero al estar la rotura más allá de esta chapa, no evitaba el paso del aire a través del conducto de EGR. Así pues, se procedió a instalar esta chapa más allá de la rotura para así evitar con total seguridad el paso de aire a la admisión a través de este conducto.

Con todo esto el problema continuó de la misma manera sin solucionarse, así que no encontrando el origen de este se pensó que podría ser causa de la ECU, debido a que al estar el motor tanto tiempo funcionando en condiciones no habituales como es la de mantener la válvula de EGR abierta continuamente en regímenes en los que no debe de estarlo, es probable que esta estuviera trabajando con un mapa de error y por ello intentaba solucionar el problema abriendo y cerrando la válvula de esta manera tan brusca.

Finalmente y como solución definitiva a este problema se optó por desconectar la válvula de EGR de la ECU y controlarla aparte. El mecanismo de funcionamiento de este tipo de válvulas se compone de, por un lado tres cables que controlan el funcionamiento del motor que abre o cierra la válvula y por otro lado dos cables más correspondientes al sensor de

posición de esta. A esta válvula al aplicarle un determinado voltaje se abre o cierra dependiendo del valor de este. Normalmente de esta función se encarga la ECU del motor, pero ya que no éramos capaces de controlarla en este caso optamos por conectar a la válvula una fuente de alimentación externa y una ECU aparte. A través de esta fuente de alimentación se le aplicaba un voltaje a la válvula y esta abría o cerraba en función de este voltaje aplicado, teniendo así un control completo de la apertura de la válvula de EGR.

Esta fue la solución definitiva que nos permitió controlar la válvula de EGR sin ningún problema y poder continuar con los ensayos de manera apropiada y sin interrupciones. No obstante, ya que con el paso del tiempo la ECU original del motor podría dar algún problema debido a la ausencia del sensor para el control de la válvula de EGR (aprovechamos el sensor original para nuestra instalación aparte), se preparó otro sensor para, en el momento que el motor diera algún error conectarlo y evitar problemas.



**Imagen 4.1:** fuente de alimentación para control de válvula EGR

Otro problema que apareció posteriormente fue un fallo en la batería del motor. Durante la realización de un ensayo se observaron picos de pérdida de par motor y el INCA mostró un fallo de batería. Al observar el voltaje que ésta estaba proporcionando vimos que era muy bajo y decidimos cambiar la batería por una nueva, dado que la inicialmente instalada llevaba en uso varios años y era posible que ya estuviera rota. Por tanto la batería se cambió por una nueva, dando así solución al problema y mientras tanto se conectó a la vieja un cargador de baterías para poder continuar con los ensayos con normalidad.

## 5. CONCLUSIONES

Durante la realización de este Trabajo de Final de Grado, basado en un proyecto real para una empresa, en el que se ha trabajado con un motor térmico de la marca automovilística RENAULT, se ha diseñado un sistema de recirculación de gases de escape (EGR), con una disposición diferente a la que se presenta de manera original en el motor, adaptándolo así a las necesidades de este proyecto.

Se ha instrumentado con gran precisión este sistema mediante varios sensores colocados en distintos puntos del circuito, con el objetivo de tener controladas en todo momento las condiciones en las que se ha trabajado, y obtener así unos resultados claros y precisos.

Y por último, se ha validado la correcta instalación e instrumentación de este sistema de recirculación de gases de escape. Realizando así, ensayos basados en el ensuciamiento de intercambiadores de calor montados en este circuito, trabajando con distintos puntos de funcionamiento del motor.

En cuanto a los resultados obtenidos en la validación de esta instalación, se ha podido observar una clara diferencia en el ensuciamiento de los intercambiadores de calor en función del punto de funcionamiento del motor con el que se ha trabajado. Presentándose así un mayor y más rápido ensuciamiento, y como consecuencia, mayor diferencia de presión entre la entrada y la salida del intercambiador, en el punto de alta opacidad frente al punto de altos hidrocarburos. Estos resultados han cumplido con las previsiones previas a los ensayos y, de esta manera, se ha conseguido obtener resultados objetivos y numéricos que lo demuestran.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

[1] Prof. F.Payry & J.M.Desantes, *Motores de combustión interna alternativos*; Editorial Reverté. Editorial UPV, 2011.

[2] Benjamín Pla Moreno, *Análisis del proceso de la recirculación de los gases de escape de baja presión en motores diésel sobrealimentados*; Tesis doctoral, 2008.

[3] Instituto universitario CMT Motores Térmicos, Universidad Politécnica de Valencia, *Encendido circuito de recirculación de gases de escape en motores térmicos*; 2012.

[4] Apuntes asignatura, *Máquinas térmicas*.



## **II. PRESUPUESTO**



## 1. PRESUPUESTO

### 1.1. INTRODUCCIÓN

En este documento se va a realizar un estudio sobre los costes que ha supuesto este Trabajo Fin de Grado, desde el montaje de la instalación hasta el último ensayo. Atendiendo principalmente a los costes de recursos humanos, que suponen la mayor parte de este presupuesto, sin olvidar también los materiales utilizados para la instrumentación.

El presupuesto estará dividido en dos puntos principales: costes de recursos humanos y costes de materiales. Además se añadirá un punto adicional, correspondiente a los costes generales (luz, agua, combustible...), sin olvidar también la amortización.

### 1.2. PRESUPUESTOS

#### 1.2.1. Costes de recursos humanos

Para este proyecto, las personas que han sido partícipes y han estado involucradas en su realización han sido un profesor del instituto de investigación CMT – Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia, encargado de proporcionar las directrices a seguir durante el proyecto y comunicarlo a la empresa pertinente, un ingeniero encargado del desarrollo del proyecto en la sala de ensayos y un técnico cuya función ha sido la de ayudar al ingeniero en las labores de montaje e instrumentación de la sala.

En la siguiente tabla se muestra desglosado el coste de todo este personal descrito, en €/h. Considerando la duración del proyecto de 4 meses, en los que se suman un total de 80 días laborales, de los cuales la duración de la jornada laboral ha sido de una media de 7,5 horas/día.

Integrantes	Clase	Dedicación (h)	Tasa (€/h)	Importe (€)
1	Profesor	300	38	11400
1	Ingeniero	600	15	9000
1	Técnico de laboratorio	600	6	3600
<b>TOTAL:</b>				<b>24000</b>

*Tabla 1.1: costes de recursos humanos*

Obteniendo con esto un presupuesto total de personal de VEINTICUATRO MIL euros.

### 1.2.2. Costes de materiales

En cuanto a los costes de materiales, en este apartado se comprende todo el material utilizado tanto para la instrumentación como para la fabricación de las piezas y elementos necesarios en la estructura del sistema de recirculación de gases de escape montada en el motor sobre el que se ha trabajado, así como elementos que haya habido que colocar posteriormente debido a roturas o al mismo desgaste de las piezas.

Por lo tanto, los materiales empleados para este sistema de EGR han sido todos los recogidos en la siguiente tabla:

Elemento	Cantidad	Coste (€/ud.)	Importe (€)
<b>Tubo de teflón</b>	2	18,45	36,90
<b>Termopares</b>	3	22,30	66,90
<b>Juntas de grafito</b>	76	2,99	227,24
<b>Batería</b>	1	63,05	63,05
<b>Válvula de EGR</b>	1	130	130
<b>Fuente de alimentación</b>	1	539,99	539,99
<b>TOTAL:</b>			<b>1064,08</b>

*Tabla 1.2: costes de materiales*

El coste de los materiales utilizados hace un total de MIL SESENTA Y CUATRO CON OCHO euros.

### 1.2.3. Costes de equipos

El cálculo del coste de cada elemento de la sala por las horas de trabajo utilizado se realiza a través de su amortización:

$$A = \frac{C}{H} \times h$$

Teniendo en cuenta que el banco dinámico ha sido utilizado durante todas las horas de los ensayos y que tanto el equipo de contaminantes HORIBA como el opacímetro se han usado alrededor de 1/3 del tiempo de ensayo, los costes de equipos han sido los siguientes:

Elemento	Amortización (€/h)	Vida útil (años)	Tiempo de funcionamiento (h)	Coste (€)
<b>Banco dinámico</b>	46,36	10	360	16689,60
<b>Equipo de contaminantes HORIBA</b>	14,53	10	120	1743,60
<b>Opacímetro</b>	6,67	10	120	800,40
<b>TOTAL COSTES DE EQUIPOS:</b>				<b>19233,60</b>

**Tabla 1.3:** costes de equipos

El total de los costes de equipos es de DIECINUEVE MIL DOSCIENTOS TREINTA Y TRES CON SESENTA euros.

#### 1.2.4. Costes generales

En cuanto a los costes generales, se atribuye un 35% de los costes parciales (costes de personal y materiales), que hacen referencia a todos aquellos costes indirectos, necesarios para la realización del proyecto pero sobre los que no se ha tenido que preocupar ninguna persona que forme parte directa del mismo, ya que son costes generales para todas las salas e instalaciones del edificio.

Estos costes generales pueden ser la luz empleada durante los ensayos, el combustible utilizado o el agua de refrigeración, todos ellos necesarios.

Concepto	Importe (€)
Costes de recursos humanos	24000
Costes de materiales	1064,08
<b>Subtotal</b>	<b>25064,08</b>
<b>Total costes generales (35%)</b>	<b>8772,43</b>

**Tabla 1.4:** costes generales

Ascendiendo así el presupuesto referente a los costes generales a un total de OCHO MIL SETECIENTOS SETENTA Y DOS CON CUARENTA Y TRES euros.

### 1.2.5. Presupuesto global

Finalmente, en este apartado se recoge el presupuesto global al que asciende la realización de este proyecto, teniendo en cuenta la suma de los presupuestos recogidos con anterioridad y añadiéndole el impuesto de valor añadido (IVA) actual, correspondiente al 21%.

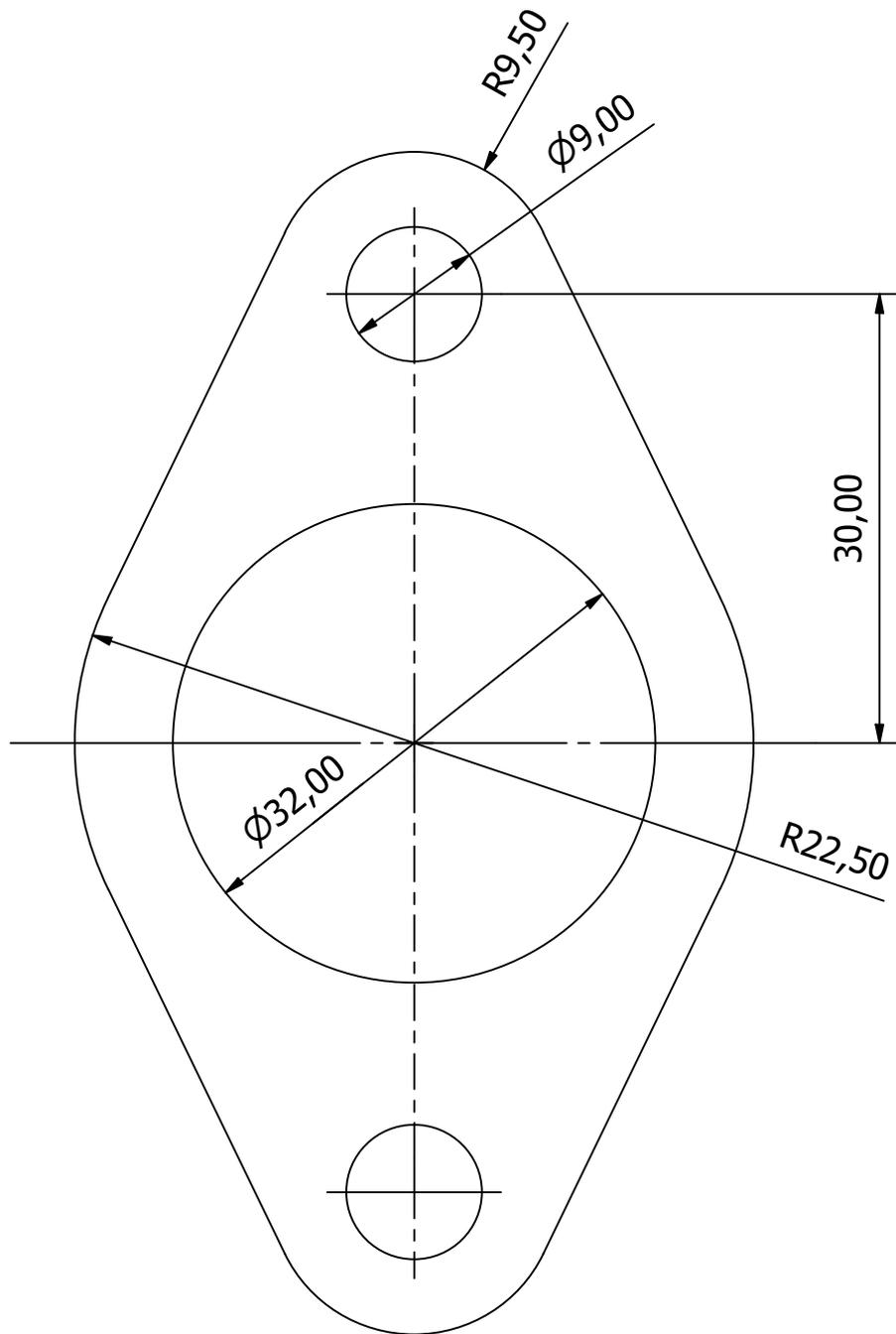
Concepto	Importe (€)
Costes de recursos humanos	24.000
Costes de materiales	1064,08
Costes de equipos	19233,60
Costes generales	8772,43
Subtotal	33836,51
IVA (21%)	7105,67
<b>TOTAL:</b>	<b>60175,78</b>

*Tabla 1.5: presupuesto global*

El presupuesto total de este proyecto asciende así a la cifra de SESENTA MIL CIENTO SETENTA Y CINCO CON SETENTA Y OCHO euros.

# **III. PLANOS**





Autor:

López Barambio, Alejandro

Unidades:

Milímetros (mm)

Espesor:

2 mm

Fecha:

15/05/2018

CMT MOTORES TÉRMICOS UPV

**JUNTA DE GRAFITO**

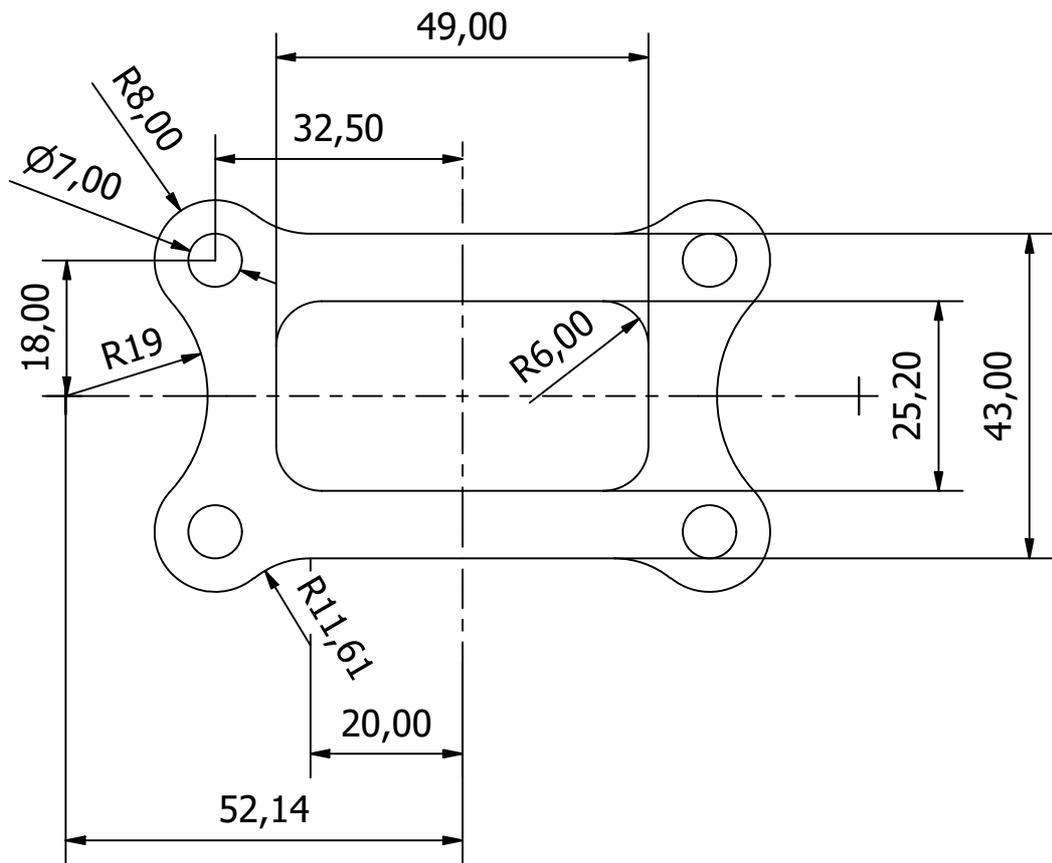
Nº DE PIEZAS: 14

Escala:

2:1

Nº de plano:

1



Autor:

López Barambio, Alejandro

Unidades:

Milímetros (mm)

Espesor:

2 mm

Fecha:

15/05/2018

CMT MOTORES TÉRMICOS UPV

**JUNTA DE GRAFITO**

Nº DE PIEZAS: 14

Escala:

1:1

Nº de plano:

2