



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño
Grado en Ingeniería Mecánica
Trabajo de Fin de Grado

DISEÑO DE REACTOR PARA LA CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS DE POST-TRATAMIENTO DE GASES DE ESCAPE DE MOTORES EN UN BANCO DE GASES SINTÉTICOS

Autor:

Sergio Cáceres Cavero

Tutor:

Vicente Remigio Bermúdez Tamarit

Valencia, Julio 2017

Índice

<u>1.- Introducción</u>	5
1.1.- Objetivos	5
1.2.- Justificación	5
1.3.- Motivación	6
<u>2.- Sistemas de post-tratamiento de los gases de escape en MCIA</u>	7
2.1.- Introducción	7
2.2.- Legislación	8
2.3.- Composición y naturaleza de los gases de escape	10
2.4.- Clasificación de sistemas de post-tratamiento de gases de escape	14
2.4.1.- Reactores térmicos	14
2.4.2.- Reactores catalíticos	14
2.4.3.- Reactores químicos	19
2.4.4.- Filtros químicos	19
2.4.5.- Filtros físicos	19
<u>3.- Soluciones para reducir las emisiones de los gases de escape en MCIA</u>	21
3.1.- Sistemas para motores MEP	21
3.1.1.- Soluciones activas	21
3.1.2.- Soluciones pasivas	22
3.1.2.1.- Catalizadores de 3 vías	22
3.1.2.2.- Trampas de NO _x	23
3.1.2.3.- Canister	24
3.2.- Sistemas para motores MEC	25
3.2.1.- Soluciones activas	25
3.2.2.- Soluciones pasivas	25
3.2.2.1.- Recirculación de gases de escape	25
3.2.2.2.- Sistemas de control de CO y HC: catalizador de oxidación	26
3.2.2.2.- Sistemas de control de partículas: Filtros de partículas	27
<u>4.- Descripción del banco de ensayos de sistemas de post-tratamiento</u>	31
4.1.- Generador de gases	31
4.1.1.- Sistema de humidificación	33
4.1.2.- Mezclador	38
4.1.3.- Circuito de refrigeración y control de presión	39
4.1.4.- Bombonas de gases	41
4.1.5.- Elementos de construcción y de seguridad	42
4.2.- Sistemas de control de la temperatura	45
4.3.- Reactor	47
4.4.- Análisis de la mezcla	48
4.5.- Esquema de la instalación	52
<u>5.- Diseño del reactor</u>	53
5.1.- Diseño mecánico	53
5.1.1.- Dimensionado del monolito	54
5.1.2.- Dimensionado del reactor	55
5.2.- Diseño térmico	61
5.2.1.- Sistema de calentamiento para la mezcla de gases	62
5.2.2.- Sistema de calentamiento para el monolito cerámico	72

<u>6.- Metodología experimental</u>	77
6.1.- Objetivos	77
6.1.- Calibración de la sonda MEXA-720NO _x	78
6.2.- Validación del generador de gases sintéticos	86
6.2.1.- Ensayo de calibración para CO	89
6.2.2.- Ensayo de validación para CH ₄	90
6.2.3.- Ensayo de calibración para CO ₂	91
6.2.4.- Ensayo de validación para el NO	92
<u>7.- Conclusión</u>	95
<u>8.- Presupuesto</u>	97
8.1.- Honorarios profesionales	97
8.2.- Coste de amortización de los equipos utilizados	98
8.3.- Coste de materiales, instrumentación y procesos de fabricación	100
8.4.- Presupuesto final	102
<u>9.- Bibliografía</u>	103
<u>PLANOS</u>	105
Módulo de entrada y de salida del reactor	106
Alojamiento central para 2 monolitos	107
Alojamiento central para 3 monolitos	108
Alojamiento central para 4 monolitos	109
Reactor	110
<u>PLIEGO DE CONDICIONES</u>	111
11.1.- Introducción	112
11.2.- Soldadura TIG	113
11.3.- Montaje del módulo de entrada y salida del reactor	114
11.4.- Montaje del alojamiento central	116
11.5.- Montaje del reactor	117
11.6.- Fichas técnicas de los sistemas de medición utilizados	118

1.- Introducción

1.1.- Objetivos

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es el diseño y el análisis de un reactor catalítico para banco de ensayo de sistemas de post tratamiento de gases de escape en MCIA. El diseño del reactor vendrá en conjunto con un banco de gases, previamente diseñado, que permite simular los gases de escape de un motor de combustión. El prototipo tendrá unas dimensiones ajustadas al banco de gases, lo cual limitará el tamaño del reactor a una escala reducida.

El estudio y diseño de un banco de ensayos que permita simular los gases de escape reales de un MCIA, con su posterior análisis catalítico supone que se puedan estudiar todo tipo de sistemas de post-tratamiento con una capacidad altísima de variación, pudiendo ajustarse al máximo a situaciones críticas de simulación. En conjunto con los fabricantes de reactores, el CMT podrá desarrollar nuevas técnicas de reducción de emisiones contaminantes para su posterior implementación en el sector del automóvil.

Tras realizar el diseño del reactor, se contemplarán los diferentes métodos para el calentamiento de los gases, logrando así elevar la temperatura de los mismos y poder simular temperaturas reales de funcionamiento. Previo análisis del reactor, se precisará una puesta a punto del banco de gases, corroborando que el generador funciona de manera correcta.

El banco completo quedará instalado en el laboratorio de emisiones del departamento de motores térmicos (CMT) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV).

1.2.- Justificación

La justificación de este trabajo viene dada no solo para finalizar mis estudios de Ingeniería Mecánica en la Universidad Politécnica de Valencia(UPV), si no también por la posibilidad que me ha dado el CMT de sumergirme y ampliar mis conocimientos en el sector de la automoción y más específicamente, en el desarrollo de nuevas tecnologías para la reducción de emisiones contaminantes.

Consigo mismo, la futura resolución de problemas de emisiones que cumplan con los requisitos de satisfacción y económicos de los clientes del sector.

1.3.- Motivación

La realización del Trabajo de Fin de Grado en el departamento de motores térmicos (CMT) viene precedida por mi afición e interés en lo relacionado con el mundo del automóvil. Con ello, la satisfacción personal de poder hacer frente a un caso real y en este caso, colaborar con el departamento en el desarrollo de un banco de ensayos. La motivación personal y la posibilidad de desarrollar nuevos conocimientos me impulsaron a embarcar este proyecto.

2.- Sistemas de post-tratamiento de los gases de escape en MCIA

2.1.- Introducción

En el siglo XXI, la venta de vehículos propulsados por MCIA ha aumentado hasta límites insostenibles. La dependencia humana sobre todo tipo de transporte, ya sea marino, ferroviario o por carretera, está causando estragos en nuestro ecosistema. El aumento del consumo de petróleo y derivados ha supuesto que se depositen toneladas de partículas contaminantes a la atmosfera, acarreando un grave impacto tanto ambiental como social sobre el planeta. La principal fuente de emisiones del siglo vigente son los MCIA (Motores de Combustión Interna Alternativos), que se encuentran bajo los capós de vehículos ligeros y pesados, y propulsando barcos y trenes. Aún sabiendo el impacto que acarrea el uso del petróleo como combustible, la fabricación de vehículos/trenes/barcos no ha cesado y el número de ventas ha ido incrementando, provocando la deposición de toneladas de partículas contaminantes.

El desarrollo e introducción de nuevas tecnologías en los MCIA han logrado disminuir los valores de emisiones en las últimas dos décadas. El desarrollo de motores turboalimentados, más compactos, capaces de desarrollar mismas potencias, con menores índices de contaminación. Además, la utilización de nuevos combustibles como el gas o inclusive, la comercialización vehículos eléctricos se han tomado como alternativas para colaborar con la reducción de emisiones. En cambio, el desarrollo de tecnologías de post-tratamiento de gases de escape ha sido el mayor avance y el más efectivo a la hora de combatir con los elementos más nocivos.

La disminución de emisiones contaminantes en vehículos con motores de combustión no se ha planteado fácil. Los sistemas de post-tratamiento han tenido que ir avanzando tecnológicamente para ajustarse cada vez más a los límites establecidos. Por ello, en la última década el área de emisiones ha cobrado mucha fuerza en el sector, lo cual ha implicado que se desvíen millones de euros cada año para la investigación y desarrollo de nuevos tratamientos. La introducción de nuevos sistemas de post-tratamiento de gases de escape es necesario para alargar la vida útil de los MCIA, además de para proteger cada vez más nuestro hábitat ante el crecimiento de las unidades.

2.2.- Legislación

Los valores de emisiones de los principales contaminantes depositados a la atmósfera por motores de combustión se ha multiplicado hasta valores perjudiciales para el ser humano. Cada vez el uso del MCIa abarca más sectores y, con el aumento de su uso y los problemas existentes en la capa de ozono y efecto invernadero, ha supuesto que desde las instituciones europeas e internacionales se pongan manos a la obra con la reducción de los contaminantes más nocivos.

Fase	Fecha	CO	HC	HC+NOx	NOx	PM
Motor Diesel (ID)						
Euro 1	07/1992	2,72	-	0,97	-	0,140
Euro 2	01/1996	1,0	-	0,90	-	0,100
Euro 3	01/2000	0,64	-	0,56	0,50	0,050
Euro 4	01/2005	0,50	-	0,30	0,25	0,025
Euro 5	09/2009	0,50	-	0,23	0,18	0,005
Euro 6	09/2014	0,50	-	0,17	0,08	0,005
Motor Gasolina (ID)						
Euro 1	07/1992	2,72	-	0,97	-	-
Euro 2	01/1996	2,2	-	0,50	-	-
Euro 3	01/2000	2,30	0,20	-	0,15	-
Euro 4	01/2005	1,0	0,10	-	0,08	-
Euro 5	09/2009	1,0	0,10	-	0,06	0,005
Euro 6	01/2014	1,0	0,10	-	0,06	0,005

Tabla 2.1. Evolución de la norma Euro y de los límites de emisiones.

Los estándares europeos, llamados normativa *Euro*, son los encargados de regular las emisiones de los principales contaminantes; es decir, regulan los valores permitidos de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx) y *particulate* o masa de material (PM) que pueden ser emitidos por los vehículos a la atmósfera. En 1992, el primer estándar europeo entró en vigor, donde ni los valores de NOx en los motores diesel y gasolina ni las PM e hidrocarburos en los gasolina estaban restringidos. Con el paso del tiempo y el aumento exponencial de la exposición humana a los contaminantes, ha sido necesario la implementación de nuevas normas Euro menos permisivas. Debido a ello, en 2013 se acordó la introducción de la norma *Euro 6*, donde los límites establecidos para NOx e HC fueron recortados.

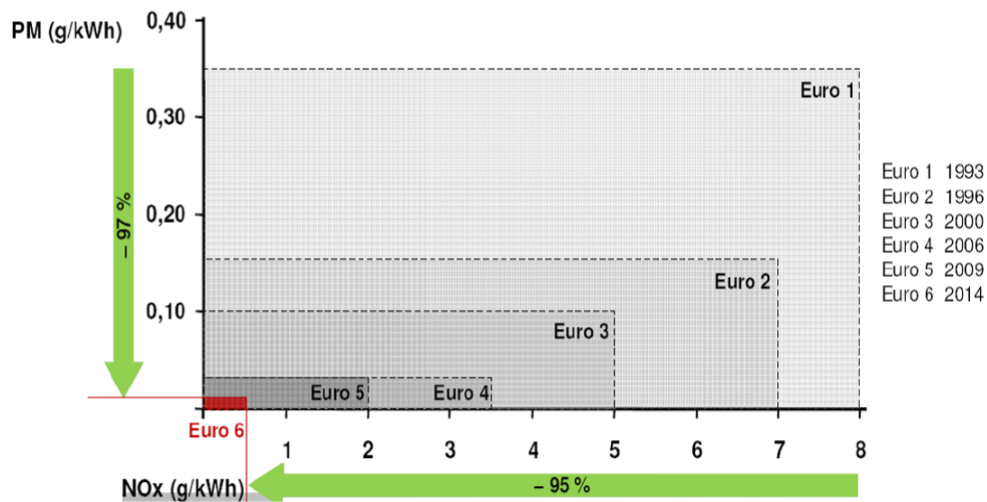


Figura 2.1. Diagrama de normativas Euro y su evolución. El aumento de las restricciones para PM y NOx.

Tras la puesta en vigor de la norma Euro 6, los fabricantes de vehículos, tanto ligeros como pesados, han tenido que desarrollar nuevos sistemas de post-tratamiento de gases de escape que hagan frente las emisiones de NO_x e HC para que sus vehículos puedan ser homologados en el espacio europeo, cumpliendo con las normas impuestas desde las comisiones centrales. Para homologar los vehículos en la UE, los fabricantes deben de asegurarse de que sus vehículos cumplen con los requisitos y se ajustan a la perfección a los valores límite, ya que si los valores se ven excedidos, esto significaría la pérdida de millones de euros y un paso atrás para la marca.

2.3.- Composición y naturaleza de los gases de escape

El flujo de gases de escape presente en el colector de escape del motor y en la línea de escape está formado de diferentes porcentajes de gases y partículas contaminantes. El porcentaje de compuestos existente varía según el grado de carga, control de la carga, homogeneidad de la mezcla y del combustible utilizado durante la combustión. En función de ello, se obtienen unos resultados u otros, pero siempre, en mayor o menor medida, existe una deposición de gases perjudiciales. Los productos contaminantes que se producen son los siguientes:

- Monóxido de carbono
- Óxidos de nitrógeno
- Hidrocarburos sin quemar
- Partículas y humos
- Dióxido de carbono
- Óxidos de azufre

Los gases de escape se forman en un 75% de N_2 , siendo el elemento predominante en los mismos. Además, están presentes el dióxido de carbono (CO_2) y el agua (H_2O), productos de la combustión. La presencia de oxígeno en la línea de escape puede darse en motores de encendido por compresión (diesel) y en motores de encendido provocado (gasolina), cuando se opera en condiciones de mezcla pobre. Por último, puede darse la presencia, en pequeños porcentajes, de aditivos de combustible y aceite.

El monóxido de carbono (CO), fruto de la combustión aire-combustible, es un gas inodoro y muy tóxico, que al ser inhalado, sustituye al oxígeno presente en el riego sanguíneo, produciendo carboxihemoglobina, una toxina que impide que el oxígeno se transfiera a los diferentes tejidos, causando la muerte en casos extremos. El monóxido de carbono es tratado posteriormente, con un catalizador de oxidación, oxidándose a dióxido de carbono, gas a tener en cuenta debido a su fuerte influencia en el efecto invernadero.

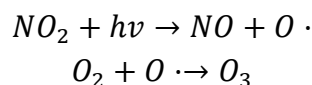
El dióxido de carbono que se encuentra en la línea de escape es producido tras la oxidación de monóxido de carbono. Con esta reacción se consigue eliminar un gas potencialmente tóxico y de manera contraproducente, se produce un gas contribuyente con el efecto invernadero. El CO_2 proviene de dos fuentes principalmente; la natural y la antropogénica.

El CO₂ ha estado presente siempre en la atmósfera, debido a la erupción de volcanes, incendios forestales, donde CO₂ es producido por el propio fuego. En cambio, el CO₂ se encontraba en pequeñas cantidades, existiendo un equilibrio con la producción de O₂ natural (plantas, algas marinas).

El gran problema surge con las fuentes antropogénicas, es decir, las fuentes de emisión por el ser humano. La mayor fuente de CO₂ humana es por el uso de combustible no renovable, el petróleo, para el uso de transporte (naval, ferrocarril, por carretera), así como para las grandes fábricas. Se estima que la producción de CO₂ por los MCIAs sea mayor que aquella producida por fábricas.

Las partículas de CO₂ presentes en el aire se encargan de absorber la radiación solar una vez esta ha impactado sobre la tierra, impidiendo que salga de la atmósfera. Esto produce un efecto de calentamiento global, implicando un aumento anual de la temperatura media del planeta, causando el deshielo de los polos, aumento del nivel del mar, contaminación de océanos y desaparición de especies marinas y de ciudades. Además del impacto global, la inhalación y exposición de CO₂ en grandes cantidades puede implicar la irritación de ojos y acarrear problemas en el corriente sanguíneo, derivando en algunos casos, a problemas cardiorrespiratorios mortales.

Los óxidos de nitrógeno NO_x suponen un problema añadido para la salud mundial y para el hábitat de las especies. Los NO_x son gases tóxicos, en particular el dióxido de nitrógeno, que son depositados y participan en la formación de smog fotoquímico y ozono. El dióxido de nitrógeno es disociado cuando la radiación solar incide sobre él, formando monóxido de nitrógeno y un radical de oxígeno que posteriormente reacciona con otra partícula de oxígeno formando ozono (O₃). Se pueden resumir las reacciones de la siguiente manera:



El ozono que permanece en la atmósfera se encarga de absorber y emitir radiación solar que ha incidido sobre la tierra. A consecuencia de este fenómeno, como en el caso del CO₂, existe un sobrecalentamiento de la tierra causando destrozos en la biodiversidad y en parajes naturales.

Los hidrocarburos sin quemar (HC) juegan un papel importante en los MEP mientras que en los MEC su presencia tiene poca influencia. En MEC los HC son formados en zonas en presencia de una mezcla demasiado pobre (combustión incompleta). En MEP, un mal control del dosado, dando como resultado un dosado rico/pobre o una combustión inestable, crea una combustión incompleta que tiene

como resultado, la generación de hidrocarburos inquemados. En los MEP, los vapores del depósito y del cárter también contribuyen en la producción de HC.

Los efectos que acarrean pueden diferenciarse en función de la naturaleza del hidrocarburo, dando la siguiente clasificación:

1. Tóxicos (olefinas, aldehídos),
2. Cancerígenos (PAH)
3. Alteración del sistema nervioso central (Hidrocarburos aromáticos monocíclicos)

Por último, la presencia de humos y partículas (PM) en la línea de escape suponen un porcentaje contaminación considerable. Las partículas son formadas por la acumulación de material en un medio filtrante y se componen de una parte líquida (aceite y combustible) y de una parte sólida (hollín y cenizas). La producción de partículas es relevante sobretodo en MEC debido a las impurezas del combustible utilizado, el diesel. En zonas con un dosado alto, se genera hollín por acumulación de combustible. Además, la introducción de la EGR ha causado que en los motores diesel se acumulen más partículas en los colectores de admisión.

Las partículas también tienen efectos irreversibles sobre la salud. Además de la conocida suciedad ambiental, se depositan sobre edificios y suelo. Las partículas, PM_{2.5} y PM₁₀, se adhieren a los alveolos y reducen la capacidad respiratoria, llegando desarrollar cáncer pulmonar.

Los humos son partículas en suspensión que absorben la luz y que en función de su color, se conforman de diferentes compuestos. Los colores dan una idea de las partículas que están suspendidas. Ejemplos de ellas son:

- Negro-Hollín
- Azul ($T < 100^{\circ}\text{C}$) - Aceite
- Azul/Blanco ($T < 100^{\circ}\text{C}$) - Combustible
- Blanco ($T < 70^{\circ}\text{C}$) - Agua

En las grandes urbes donde existe mayor tráfico de vehículos, la concentración de NO_x y HC se dispara. El smog fotoquímico es un fenómeno, visiblemente detectable por la formación de una nube gris densa y oscura que envuelve las ciudades. Las condiciones ambientales y partículas suspendidas necesarias para la formación de smog son:

1. NO_x
2. COH
3. Luz ultravioleta

Debido a los problemas que surgen con la emisión de contaminantes a la atmósfera, tanto problemas de salud como problemas causados a la biodiversidad, se han desarrollado múltiples sistemas de post-tratamiento para disminuir al máximo posible las emisiones de compuestos tóxicos y contribuyentes con el efecto invernadero.

2.4.- Clasificación de sistemas de post-tratamiento de gases de escape

Los sistemas post-tratamiento pueden montar diferentes tipos de reactores, cada uno con un objetivo. Los tipos de reactores pueden clasificarse en 5 tipos:

1. Reactores térmicos
2. Reactores catalíticos
3. Reactores químicos
4. Filtros químicos
5. Filtros físicos

2.4.1.- Reactores térmicos

Los reactores térmicos tienen como objetivo la oxidación de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos (HC) y en mezclas ricas, de hidrógeno (H₂). Para un funcionamiento eficiente del reactor, es necesario que la temperatura de los gases de escape sea suficientemente elevada, alrededor de los 800 °C, además de suficiente concentración de oxígeno para llevar a cabo las reacciones de oxidación en el tiempo deseado. Si no se dan las condiciones anteriores, el rendimiento del reactor cae y los gases requieren un tiempo de residencia mayor en el interior del catalizador. Es por ello que este tipo de reactores se instalan cerca del colector de escape, aprovechando así al máximo la temperatura de salida de los gases de escape.

Cuando se opera con mezclas ricas, se produce una inyección de oxígeno antes del reactor para garantizar que existe suficiente oxígeno en la línea de escape como para que las reacciones fructifiquen. Por otro lado, en condiciones de mezcla pobre, el rendimiento de conversión del monóxido de carbono e hidrocarburos es bajo e insuficiente. Las partículas de NO_x no son tratadas en este tipo de reactores, por lo que, este sistema de post-tratamiento ha quedado obsoleto desde los años 70.

2.4.2.- Reactores catalíticos

Los reactores catalíticos son los denominados catalizadores o conversores catalíticos y son la base de los sistemas de post-tratamiento de gases de escapes a

día de hoy. Los catalizadores están instalados en la línea de escape, y en presencia de una sustancia catalizadora, permiten alcanzar el equilibrio químico de las reacciones de reducción y oxidación de CO, HC y NO_x. El substrato cerámico o metálico es el elemento que mantiene el contacto con los gases y se encarga de forzar las reacciones de catálisis. Se componen principalmente de 3 partes:

1. Soporte
2. Recubrimiento (washcoat)
3. Componente catalizador

Soporte

Los soportes del catalizador están clasificados en función de su composición:

1. Metálico
2. Cerámico

Los monolitos son materiales cerámicos o metálicos con estructuras continuas que contienen muchos conductos o canales, en su mayoría paralelos o aproximadamente paralelos. Sobre las delgadas paredes del monolito se deposita la capa activa, la cual se encarga de provocar las reacciones químicas.

En la actualidad el monolito cerámico en forma de panel de abeja es el estándar para todos los fabricantes. La investigación en este campo ha ido dejando a parte los monolitos metálicos debido a que los monolitos cerámicos tienen mejores características técnicas a precio más económico.

Los monolitos cerámicos instalados dentro de los reactores catalíticos en la línea de escape de un vehículo están diseñados para soportar múltiples situaciones críticas. Los monolitos deben de soportar vibraciones mecánicas provenientes de las irregularidades de la calzada y de esfuerzos mecánicos. Además, debido a malas inyecciones de combustible y las reacciones exotérmicas, soportan temperaturas por encima de los 1200°C. Es por ello que los monolitos cerámicos tengan que cumplir con unos requisitos de diseño muy específicos. Los requisitos necesarios para la fabricación de un substrato ideal son:

- Gran superficie de contacto
- Bajo coeficiente de expansión térmico
- Alta porosidad

- Resistencia térmica a temperaturas por encima de los 1200°C
- Capacidad de transportar calor y masa de manera eficiente
- Buena eficiencia durante el light-off del catalizador
- Resistencia mecánica
- Baja pérdida de carga frente a la corriente de gases

Los monolitos cerámicos se fabrican principalmente por corrugado o extrusión y posteriormente son calcinados en un horno. El método de fabricación y las características de la materia prima determinan las propiedades del monolito. El material más común es la cordierita porosa ($2\text{MgO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 5\text{SiO}_2$). La estructura de panel de abeja con celdillas cuadradas es la configuración más utilizada.

Recubrimiento / washcoat

El recubrimiento o *washcoat* supone la deposición de sustancias activas sobre las superficies de las paredes interiores del monolito cerámico. Mediante un recubrimiento de óxidos inorgánicos, que depende de la función del monolito, se depositará un óxido u otro. La función de la deposición es aumentar la superficie de contacto con el gas de manera que se aceleren las reacciones químicas, aumentando la superficie activa en el orden de 10000 a 440000 m^2 / dm^3 .

En catalizadores de tres vías se usa normalmente óxido de aluminio, además de depositar otros óxidos inorgánicos como el óxido de cerio, que actúa como atrapador de oxígeno. El uso de metales como el V, Fe y Zr sirven para reducir la formación de óxidos de azufre, así como para evitar la sinterización de metales preciosos.

Componente catalizador

Los metales preciosos más utilizados en el sector del automóvil son el platino (Pt), paladio (Pd) y el rodio (Rh), además de aleaciones entre ellos. Dependiendo de la función del catalizador, se escogerá un metal precioso u otro, siendo el paladio el más efectivo frente al CO y olefinas, el platino para las parafinas y el rodio para la reducción de óxidos de nitrógeno (NOx). Por ejemplo, en las oxidaciones simultáneas dadas en los catalizadores de tres vías, se utiliza una combinación de Pt+Pd con Rh para poder oxidar los NOx y reducir CO y HC.

En la siguiente figura se puede ver el monolito a diferentes escalas microscópicas, con correspondiente descripción de cada capa.

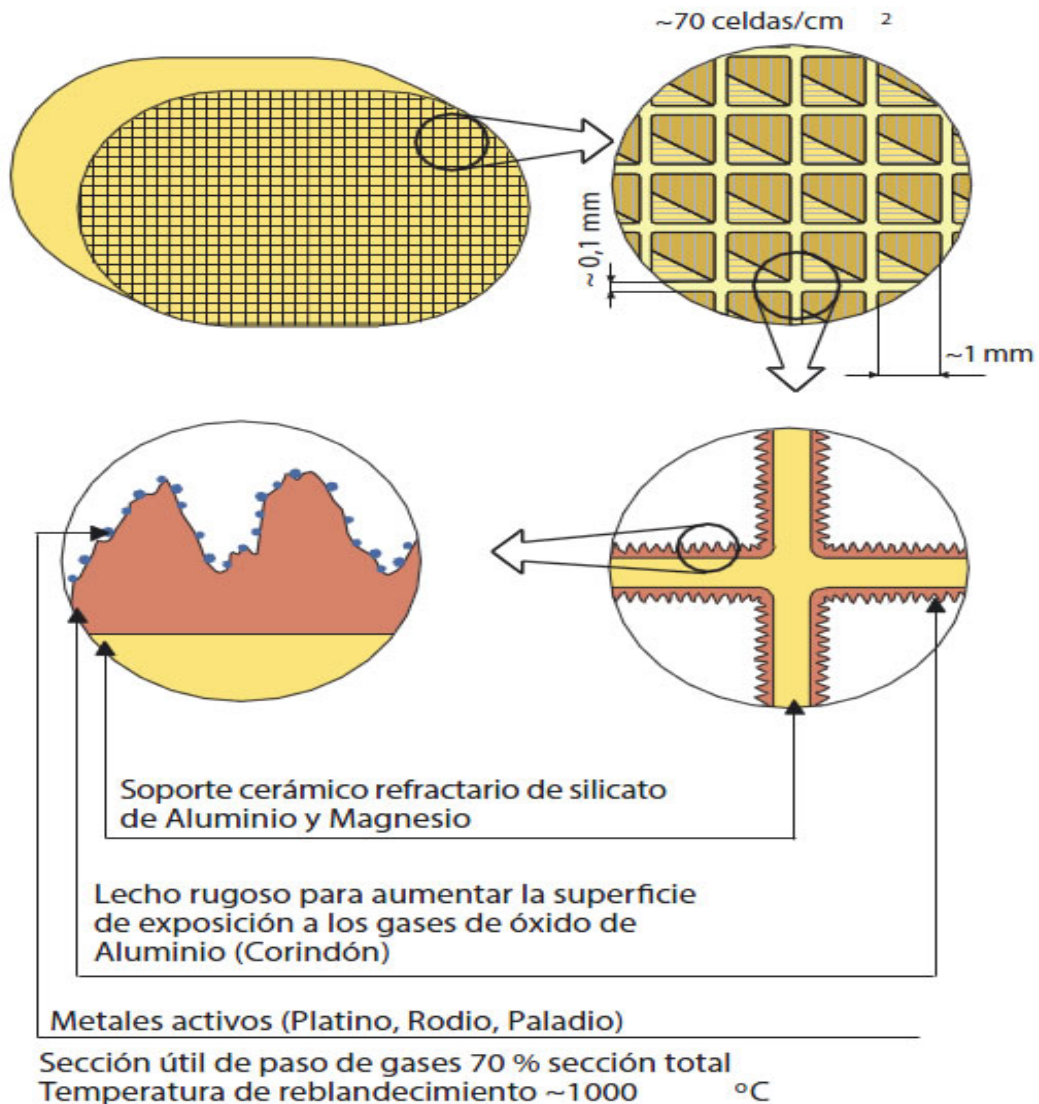


Figura 2.2. Escala microscópica de un monolito cerámico.

El reactor catalítico está formado de un monolito cerámico, un material aislante que recubre el monolito y una carcasa de chapa metálica que recubre y protege el monolito. El material aislante que se utiliza es la lana de roca, con una conductividad térmica muy baja que permite aislar el monolito y mantenerlo a temperaturas altas, lo cual es beneficioso para que la eficiencia del catalizador sea máxima. La carcasa del reactor está fabricada de chapa de acero inoxidable resistente a vibraciones mecánicas y a gases corrosivos. La función principal es

proteger el monolito ante cualquier impacto que pueda sufrir ya que el monolito es muy frágil.

De manera esquemática podemos ver las 3 capas macroscópicas que conforman el reactor catalítico final.

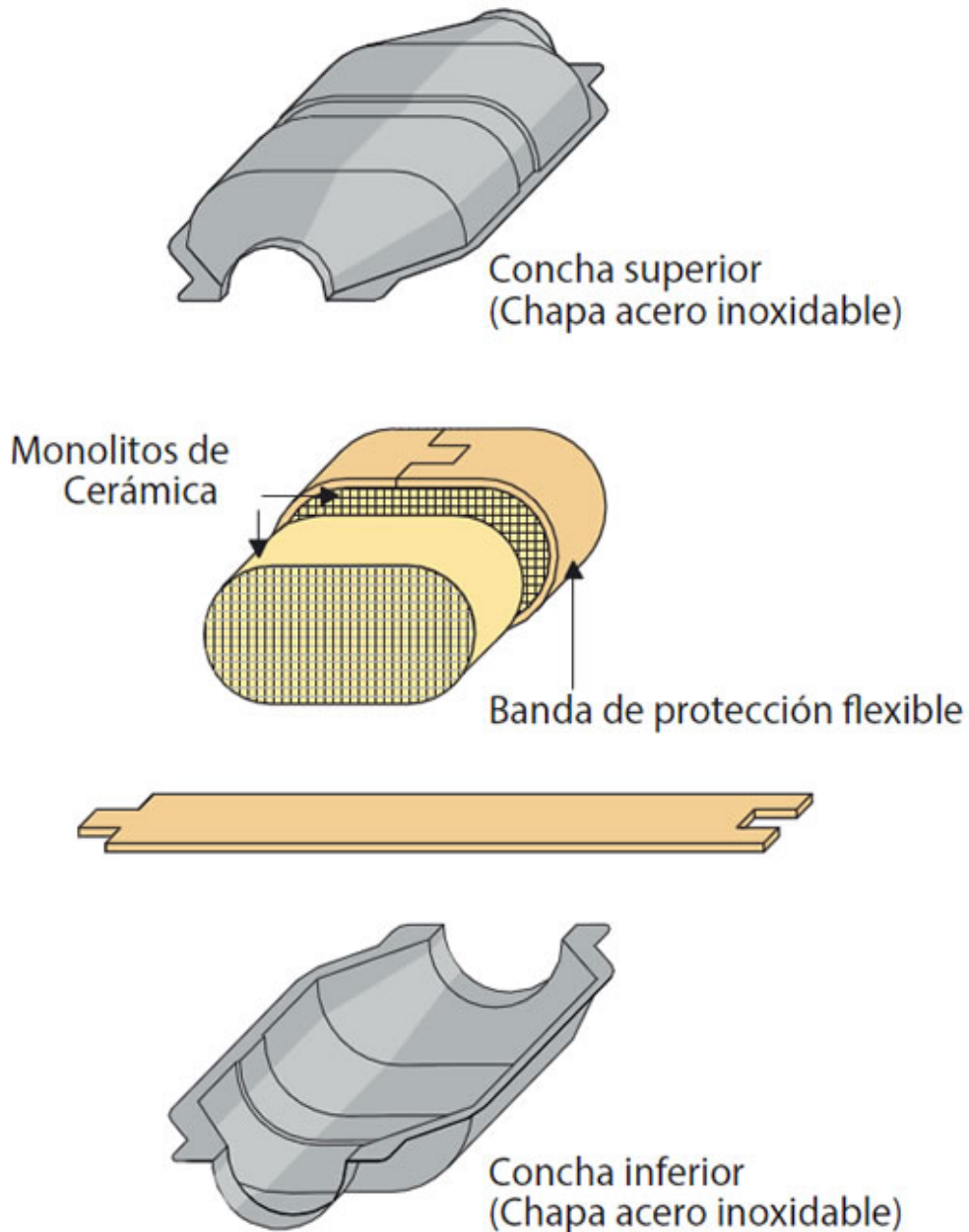


Figura 2.3. Composición de un reactor catalítico a una escala macroscópica.

2.4.3.- Reactores químicos

Los reactores químicos actúan con una inyección de un compuesto químico que permite la reducción del contaminante. El sistema más conocido es el SCR (Selective Catalytic Reduction).

2.4.4.- Filtros químicos

Estos sistemas de filtración de partículas retienen y acumulan partículas contaminantes en el interior de los filtros. Tras un tiempo, el filtro alcanza un punto de saturación y precisa una regeneración del mismo. Ejemplos de filtro químico son las trampas de NOx para tanto vehículos diesel como gasolina.

2.4.5.- Filtros físicos

Los filtros físicos tienen como objetivo el atrapar partículas líquidas y sólidas que componen los gases de escape del motor. En función del tamaño del vehículo, adquieren unas dimensiones u otras, ya que su eficiencia en parte depende del volumen del filtro. Un ejemplo de filtro físico es el filtro de partículas o FAP.

3.- Soluciones para reducir las emisiones de los gases de escape en MCI

Los fabricantes de vehículos han centrado las miradas en desarrollar sistemas de post-tratamiento que permitan acoplarse a las estrictas normas Euro. Además de los tratamientos catalíticos y los diferentes filtros que se montan en las líneas de escape, existen otro tipo de soluciones que no actúan directamente sobre los gases, si no que disminuyen la producción de gases contaminantes. Estas soluciones se pueden clasificar en dos tipos:

1. Soluciones activas
2. Soluciones pasivas

Las soluciones activas se basan en el control de emisiones dentro de la cámara de combustión, medidas que se pueden tomar para reducir que, tras la combustión, se generen grandes cantidades de contaminantes debido a un mala gestión de la mezcla. Por otro lado, las soluciones pasivas son aquellas que se basan en un principio de post-tratamiento de gases de escape, haciendo pasar a los gases de escape por reacciones químicas para lograr una menor emisión de contaminantes.

3.1.- Sistemas para motores MEP

3.1.1.- Soluciones activas

Control del dosado (mezclas pobres o estequiométricas)	CO y HC
Sistema de encendido electrónico	CO y HC
EGR	NOx
Inyección directa	HC
Distribución variable	HC

Tabla 3.1. Soluciones activas y contaminantes implicados en MEP.

Las soluciones activas no reducen lo suficiente los contaminantes en cuestión, por lo que la combinación con soluciones pasivas es necesaria. Para los motores de gasolina, se emplean 3 sistemas de post-tratamiento:

1. Catalizadores de 3 vías
2. Canister
3. Trampas de NOx

3.1.2.- Soluciones pasivas

3.1.2.1.- Catalizadores de 3 vías

Los catalizadores de 3 vías se usan principalmente en los motores de encendido provocado. Estos catalizadores permiten reducir las partículas de NOx y oxidar las de CO y HC presentes en los gases de escape de manera simultánea. Para asegurar un rendimiento de conversión óptimo de los 3 contaminantes, la ventana del dosado relativo tiene que oscilar entre 0,998 y 1,007. Estos valores de dosado solo pueden darse en los MEP de mezcla homogénea y con un control sobre la mezcla muy preciso. Para ello se instalan sonda de presencia de oxígeno antes y después del catalizador, llamada sonda lambda, así como un control electrónico de la inyección de combustible. Cuando la sonda lambda detecta una concentración de oxígeno excesiva en los gases de escape, la unidad de control inyecta enriquece la mezcla automáticamente. En el caso contrario, la mezcla se empobrece, añadiendo una cantidad fija de oxígeno. Con esta tecnología, se asegura de que se trabaja con un dosado relativo lo más cercano a 1 posible, dentro de la ventana que permite obtener el rendimiento del catalizador por encima del 80%. Los agentes catalizadores utilizados son rodio (*Rh*), paladio (*Pd*) y platino (*Pt*).

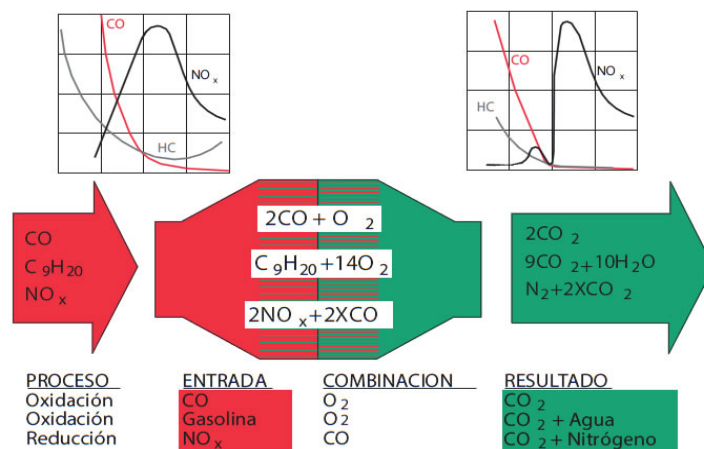


Figura 3.1. Conversión catalítica del catalizador de 3 vías en función del dosado relativo.

Uno de los problemas del catalizador de 3 vías es el arranque en frío y el rendimiento bajo el cual trabaja en estas condiciones. Para poder controlar las emisiones de CO y HC, se instalan catalizadores de arranque de baja inercia térmica cerca del motor. Otra posibilidad concebida es la instalación de un sistema de retención de HC, donde los HC quedan atrapados en un absorbente de silicalita o zeolita mientras que la temperatura de servicio sigue siendo fría como para garantizar un funcionamiento óptimo del catalizador. Una vez la temperatura deseada se alcanza (150-200°C), los HC quedan liberados para su post-tratamiento catalítico.

En la siguiente figura se pueden ver los elementos que componen el catalizador de 3 vías, así como también ver la entrada y salida de productos.

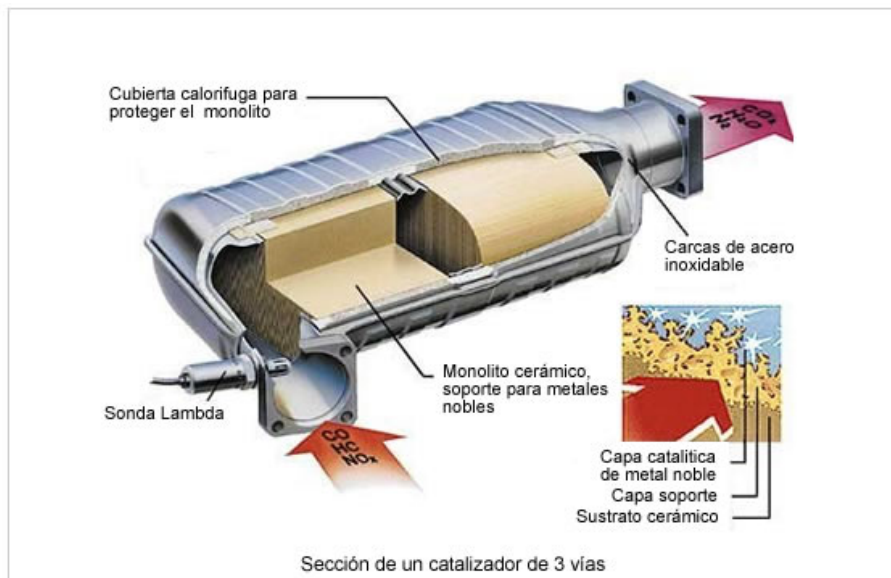


Figura 5. Sección de un catalizador de 3 vías.

3.1.2.2.- Trampas de NO_x

En relación a las trampas de óxidos de nitrógeno NO_x, cabe decir que se implementaron en los motores gasolina de inyección directa (GDI) para cuando se trabaja con mezcla pobre, donde la conversión de NO_x en los catalizadores de tres vías es muy bajo.

Los NO_x pasan por el filtro, donde en presencia de óxido bórico (agente), los NO_x quedan atrapados. Cuando el filtro necesita una regeneración, se hace pasar una mezcla ligeramente rica, que permite que los NO_x sean liberados para la posterior reducción en el catalizador de tres vías junto a la oxidación de HC y CO con una buena conversión catalítica.

3.2.- Sistemas para motores MEC

Los motores de encendido por compresión o también llamados *motores diesel* son una fuente importante de emisión de contaminantes. A diferencia de los MEP, en MEC los elementos contaminantes que predominan son los óxidos de nitrógeno (NO_x) y las partículas (PM). Para reducir las emisiones se han propuesto dos tipos de soluciones; las activas y las pasivas, como ya ocurriría en MEP.

3.2.1.- Soluciones activas

Retraso del punto de inyección	NO_x
EGR	NO_x
Control del dosado durante el transitorio	PM
Diseño de la cámara de combustión	PM

Tabla 3.2. Soluciones activas y contaminantes implicados en MEC.

3.2.2.- Soluciones pasivas

3.2.2.1.- Recirculación de gases de escape

La recirculación de gases de escape se realiza a través de la válvula EGR, siglas que significan *Exhaust Gas Recirculation*. Los gases de escape son recirculados hacia un enfriador, donde se disminuye la temperatura antes de mezclarlos con el aire de admisión. Se necesita enfriar los gases recirculados para que la temperatura de la cámara de combustión disminuya y la producción de óxidos de nitrógeno sea menor. El circuito se muestra en la siguiente figura.

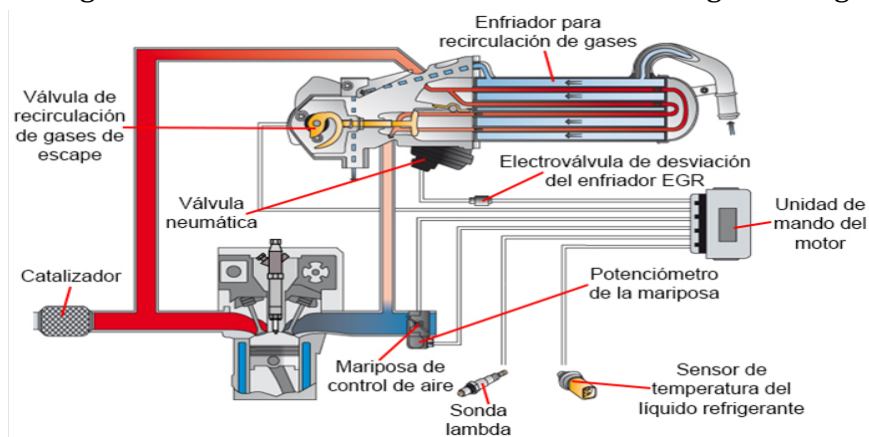


Figura 3.2. Sistema de recirculación de gases de escape.

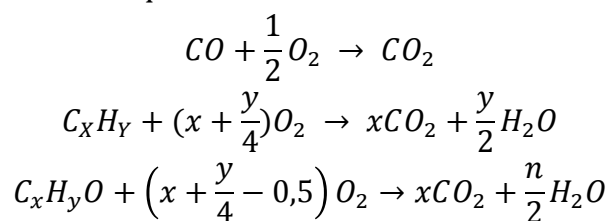
El porcentaje de gases de escape recirculados varía según la disminución de óxidos de nitrógeno que se quiera conseguir, llegando a un máximo de 50% de recirculación. La recirculación de gases implica un aumento de partículas de PM e HC a elevada carga, por lo que se puede aplicar solo en grados de baja carga para no colapsar los sistemas de admisión del motor. Esta medida se decidió implementar a partir de la norma Euro 2, en 1996.

Las soluciones pasivas que se implementan en las líneas de escape de los MEC son diferentes a aquellos en los MEP. En los motores diesel cobran mucha fuerza las partículas y los óxidos de nitrógeno, siendo estos últimos los más problemáticos en el área del diesel. Por ello, existen varios métodos de reducción de NOx que permiten a los fabricantes alcanzar las concentraciones de NOx deseadas.

3.2.2.2.- Sistemas de control de CO y HC: catalizador de oxidación

Los catalizadores de oxidación, denominados DOC (*Diesel Oxidation Catalyst*) son los utilizados en los motores de encendido por compresión. Los DOC se encargan de oxidar el monóxido de carbono, los hidrocarburos y algunos hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) presentes en los gases de escape. La reducción de los óxidos de nitrógeno NO_x se realiza independientemente con otro método de post-tratamiento.

Siendo las reacciones químicas llevadas a cabo en el catalizador:



El uso de un catalizador de tres vías no es posible en este tipo de motores debido a las condiciones bajo las cuales trabaja. Si se usara un catalizador de tres vías, el rendimiento de conversión de los 3 gases más nocivos no nos permitiría estar entre los valores dictaminados por la legislación.

El problema que surge con los DOC es cuando trabajan a temperaturas inferiores a los 200°C, donde el rendimiento de conversión es bajo y no se alcanzan los valores de concentración de emisión deseados.

En la siguiente figura se observa un DOC donde entran HC, CO y SOF y como reaccionan para dar como producto H₂O y CO₂.

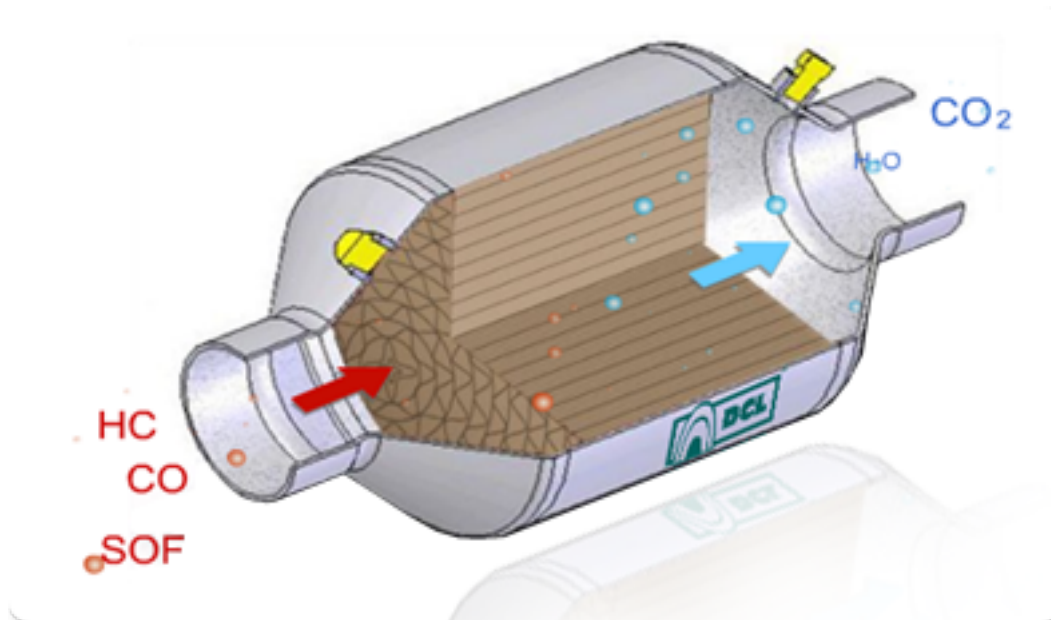


Figura 8. Sección de un catalizador de oxidación (DOC).

3.2.2.2.- Sistemas de control de partículas: Filtros de partículas

Uno de los grandes quebraderos de cabeza de las grandes compañías del sector del automóvil es la reducción de partículas (PM) en los motores diesel. Las PM, o denominadas *Particulate Matter*, compuestas de hollín, hidrocarburos, sulfatos, agua y en una cantidad mínima, de cenizas, son muy perjudiciales para nuestro hábitat. Es por ello que desde el comisionado de la unión europea se haya decidido restringir cada vez más su deposición a la atmosfera. Para controlarlas se han desarrollado los filtros de partículas DPF, o *Diesel Particulate Filter*.

Los filtros de partículas que más se utilizan en el sector son los llamados de tipo *wall-flow*, donde los gases de escape son forzados a pasar por un monolito cerámico que actúa como filtro físico. Los estrechos canales del monolito tienen los extremos sellados de manera que el flujo de gas se ve obligado a atravesar las estrechas paredes del monolito, quedando retenidas en ellas las partículas de hollín. La eficiencia del filtro de partículas *wall-flow* puede alcanzar el 90-95% de eficiencia, siendo este una de las grandes ventajas frente al filtro de no *wall-flow*.

Una vez las partículas de hollín son atrapadas y el paso de flujo de gases de escape se ve restringido, se pueden producir contrapresiones que pueden ser perjudiciales para el motor. Tras verse alcanzada una presión de saturación, se debe de proceder al proceso de regeneración del mismo. Para la regeneración del filtro se debe de trabajar a una temperatura elevada, alrededor de los 500-600°C, y con una inyección mayor de combustible (entorno al 10-15%), para que las partículas puedan ser quemadas. Si la regeneración automática del filtro no puede llevarse a cabo (no se da la temperatura necesaria, como puede ser en el caso de trayectos cortos), el filtro puede quedar demasiado tiempo saturado y se necesite una limpieza más exhaustiva o incluso un cambio.

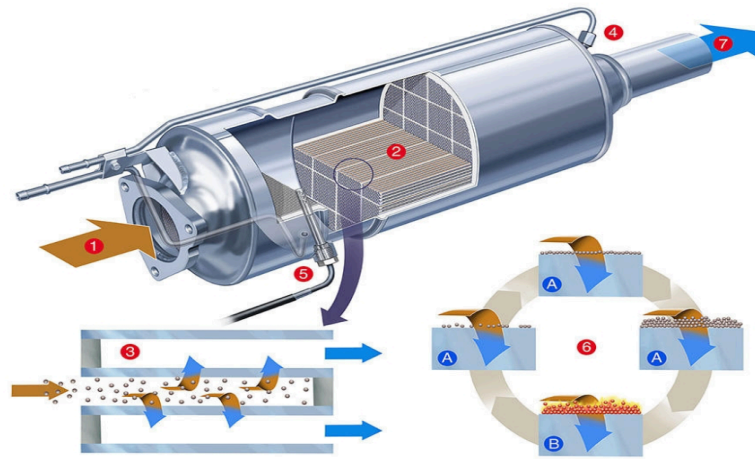


Figura 9. Sección de un filtro de partículas.

3.2.2.3.- Sistemas de control de NOx

La producción y posterior deposición de óxidos de nitrógeno (NOx) en los vehículos diesel ha tenido que ser limitado y controlado con diversos sistemas de post tratamiento con el principal objetivo de reducir las emisiones. Los óxidos de nitrógeno son las partículas más dañinas producidas tras la combustión entre aire y diesel dentro de la cámara de combustión de los motores. Las partículas de NOx son realmente cancerígenas y perjudiciales para los pulmones, además de producir el efecto de lluvia acida, causando graves destrozos en nuestro ecosistema y en aguas superficiales.

Los 2 sistemas que se pueden implementar en los motores diesel para el control de emisiones de NOx, además de la ya mencionada EGR, son los siguientes:

- 1. Trampas de NOx (LNT)**
- 2. Catalizador selectivo de reducción (SCR)**

3.2.2.4 Trampas de NOx (LNT)

Con un funcionamiento parecido al que tienen los filtros de partículas con las PM y hollín, las trampas de NOx tienen como objetivo el atrapar las partículas de NOx presentes en la línea de escape. En los motores diesel, trabajando con una mezcla pobre, el NO se oxida a NO2, quedando este atrapado en hidróxido de bario. Cuando el sensor de NOx instalado en el sistema detecta que se ha alcanzado un máximo de concentración de NO, la unidad permite inyectar más combustible para eliminar el oxígeno presente en la línea de escape. Tras la liberación de NO, este reacciona con CO, dando como producto N2 y CO2.

La fabricación de las trampas de NOx ha significado un problema a la hora de implementarlo en los vehículos. El uso de metales preciosos tales como el platino o el rodio ha hecho que el precio se encarezca de manera considerable. Además de ello, este sistema es muy susceptible al azufre, por lo que para un correcto funcionamiento se debe garantizar que el porcentaje de azufre presente sea menor a 10ppm. Añadiendo que se incrementa el consumo de combustible debido a las post-inyecciones y que la conversión de contaminantes no supera el 80%, este sistema ha perdido fuerza en el sector.

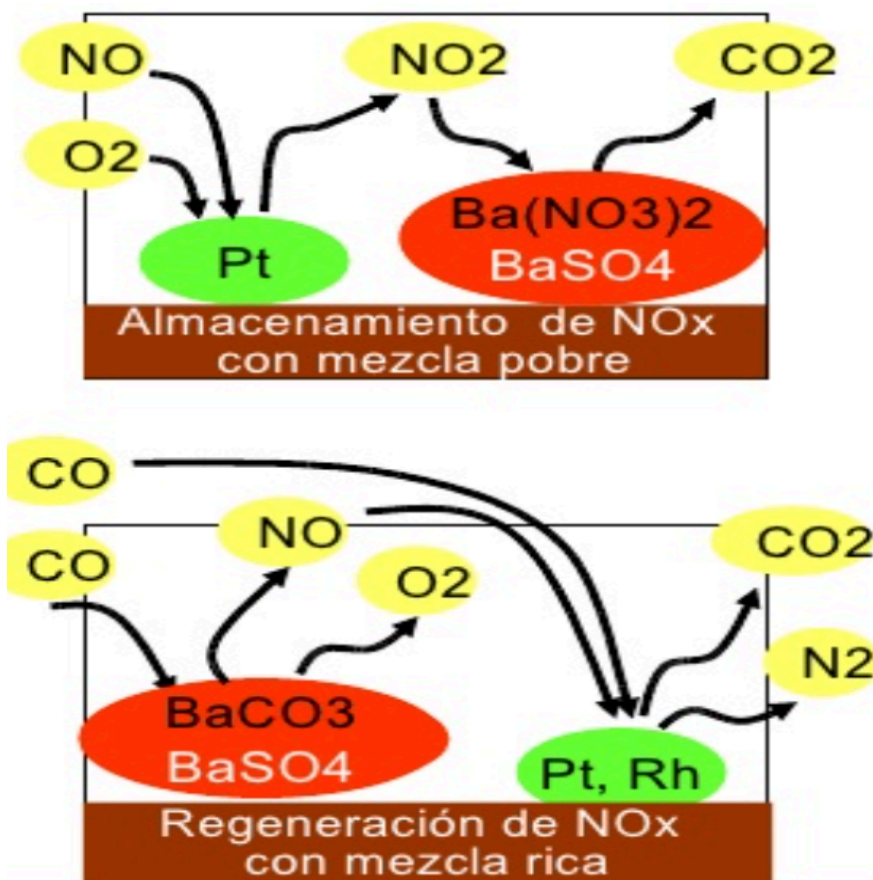


Figura 10. Funcionamiento de la trampa de NOx en función del tipo de mezcla (pobre/rica).

3.2.2.5.- Reducción catalítica selectiva (SCR)

La reducción catalítica selectiva (SCR) es el ultimo método desarrollado por los fabricantes para la reducción de partículas NOx. Desde la entrada en vigor de la norma euro 6, todos los vehículos diesel fabricados deben de llevar instalados este sistema de reducción de NOx en la línea de escape.

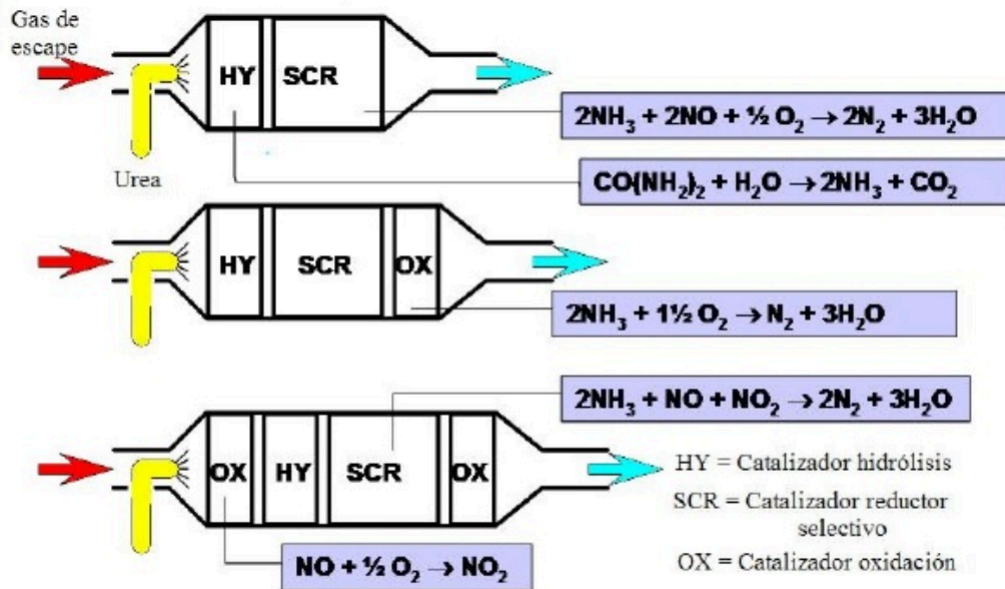


Figura 11. Diferentes etapas del SCR con las correspondientes reacciones químicas llevadas a cabo durante el proceso.

En la primera etapa de oxidación (OX en la figura), vemos como el oxido de nitrógeno(NO) se oxida en presencia de oxigeno a dióxido de nitrógeno (NO2). Tras ello, viene una inyección de urea (AdBlue en el sector del automóvil) y con ello, la hidrólisis del mismo para formar amoniaco (NH3) y CO2. En la tercera etapa, el amoniaco, NO y NO2 reaccionan para formar N2 y H2O. Para terminar, un catalizador de oxidación se encarga de oxidar el amoniaco para dar como producto N2 y agua.

La reducción catalítica selectiva permite una reducción de mas del 80% de los óxidos de nitrógeno, con un coste bastante más bajo de producción que las trampas de NOx, por ello es el sistema implementado en las líneas de escape para reducir las emisiones de NOx.

4.- Descripción del banco de ensayos de sistemas de post-tratamiento

El banco de ensayo con el que se trabajará para la generación mezcla de gases y análisis de post-tratamientos de gases de escape, ha sido diseñado para desarrollar mezclas de gases semejantes a las producidas por MCIA. Este banco de ensayo permite evaluar los diferentes dispositivos de post-tratamiento de gases de escape tales como; filtros de partículas, trampas NO_x, catalizadores de tres vías u oxidación. El principal objetivo a la hora de usar este sistema es evaluar la eficiencia de los sistemas y verificar el comportamiento ante diferentes concentraciones de componentes químicos.

Para estudiar de forma controlada de los sistemas de post-tratamiento, las reacciones catalíticas y comportamiento de la mezcla ante diferentes tratamientos, se deben completar 4 fases que permitirán obtener los resultados finales deseados.

- Generación de mezclas de gases sintéticos similares a los del motor
- Sistemas de calentamiento de mezcla
- Reactor catalítico
- Adquisición de datos del proceso termoquímico

4.1.- Generador de gases

La primera etapa del banco de ensayo es el generador de mezclas de gases sintéticos. La simulación sintética a través de un banco de gases proporcionará la mezcla homogénea de gases deseada. Gracias a la instalación de caudalímetros con unidad de control, existe un control electrónico de la mezcla en todo momento. Mediante un programa informático se podrá variar las concentraciones de los gases de manera sencilla y segura, pudiendo proceder al cierre inmediato de la instalación en caso de fuga de gases o revisión pertinente. Se procederá a la descripción de los siguientes elementos:

- Sistema de humidificación
- Mezclador
- Enfriador y válvula de contrapresiones
- Botellas de gases
- Elementos de construcción y de seguridad

A continuación se verán los esquemas que describen el generador de gases de manera gráfica.

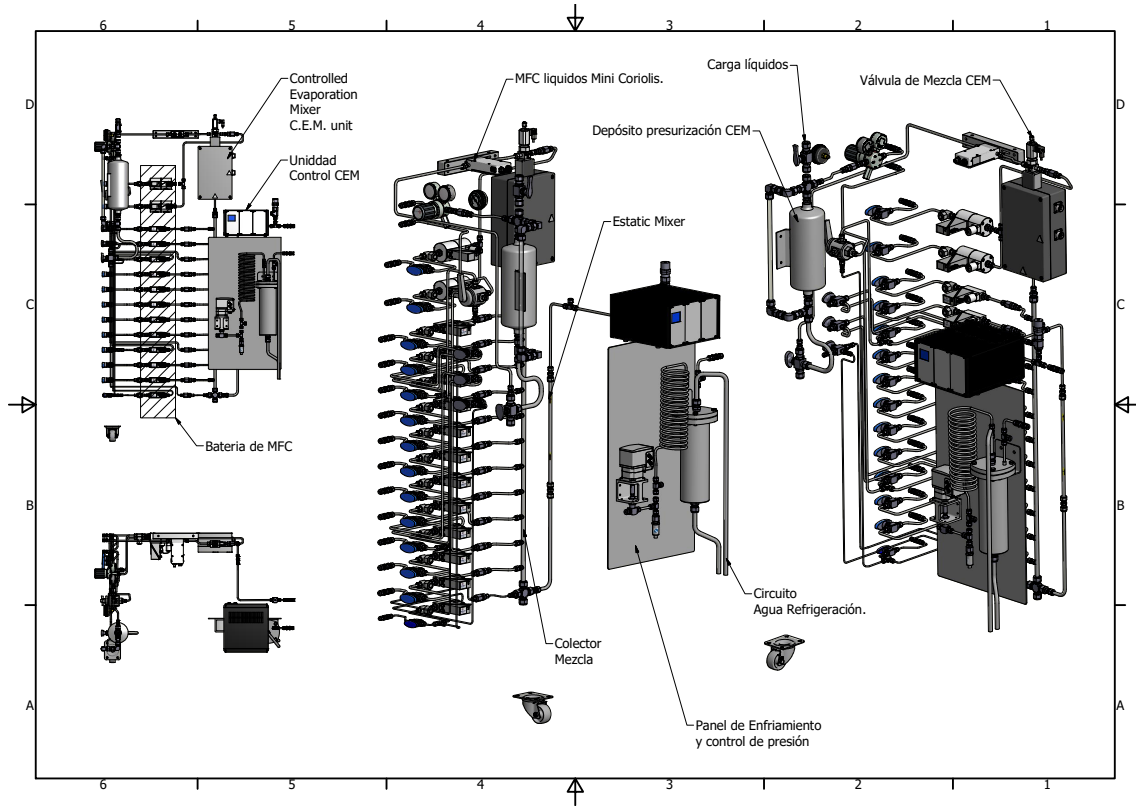


Figura 4.1. Elementos que componen el banco de gases.

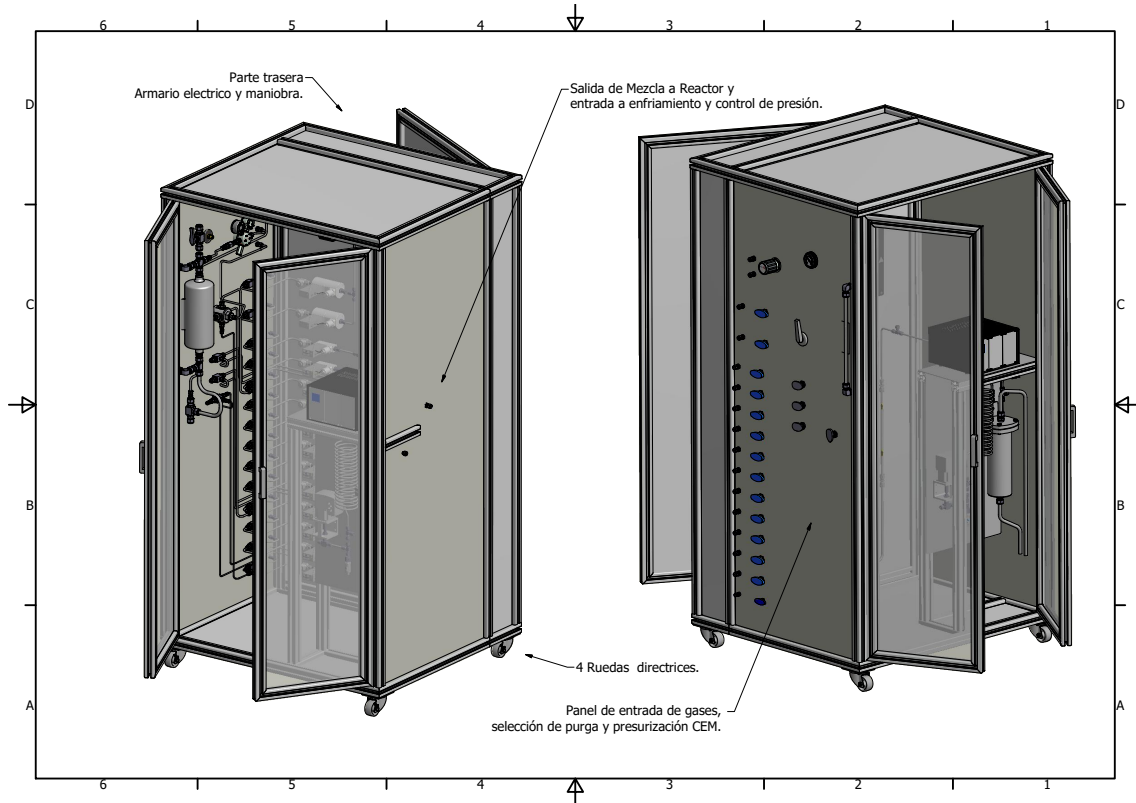


Figura 4.2. Diseño exterior del generador de gases.

4.1.1.- Sistema de humidificación

Los gases presentes en los colectores de escape de los motores de combustión interna alternativos están formados de múltiples elementos, entre ellos de agua. La presencia de agua en los gases de escape implica que se necesite humidificar la mezcla de gases sintéticos generada.

Dada una cantidad de aire y de combustible que reaccionan en el interior del cilindro, y sabiendo el dosado bajo el cual trabaja el motor, se puede calcular la cantidad de agua que habrá presente tras la reacción. El agua presente en los gases de escape proviene de 3 fuentes principalmente:

1. Aire de admisión
2. Producto de la combustión entre aire y combustible
3. Aire en exceso en situaciones de operación con dosado relativo <1

La última fuente solo está presente en MEC, donde se trabajan con dosados <1 y existe exceso de aire en la cámara de combustión. En MEP, al trabajar con dosados de 1, no existe exceso de aire en la línea de escape.

Se ha trabajado en la selección del sistema de humidificación calculando el máximo caudal a inyectar de agua en la instalación posible y, con apoyo de los parámetros anteriormente definidos, se seleccionó el sistema más adecuado a la instalación.

Realizando los cálculos oportunos, se obtuvo un caudal másico de agua de diseño de 0.237kg/h. La inyección de agua puede darse inyectando directamente agua o añadiendo aire con una humedad conocida, humidificando en ambos caso la mezcla de gases.

La unidad de humidificación “Controlled Evaporated Mixer” será la encargada de mezclar el gas base con el agua, procediendo a la vaporización del gas transporte. El sistema Bronkhorst HIGH-TECH B.V de serie CEM es un sistema único que permite un control de masa de vapor y de mezclas que contienen hasta 1000 g/h de vapor.



Figura 4.3. Unidad del “Controlled Evaporator Mixer” instalada en el banco.

Los caudalímetros de líquido, en nuestro caso agua, y del gas transporte N₂/CO₂/Aire, controlarán el paso de sus respectivos elementos hacia la válvula reguladora del CEM. En ese encuentro, el gas y el agua serán mezclados y pasarán al evaporador, donde habrá un intercambio de calor. El agua se evaporará y el gas proporcionado será el encargado de transportar el vapor hasta el siguiente proceso, donde la mezcla gas-vapor se combinará con los demás gases, formando el flujo de gases sintéticos final. En la siguiente figura se muestra el esquema del humidificador.

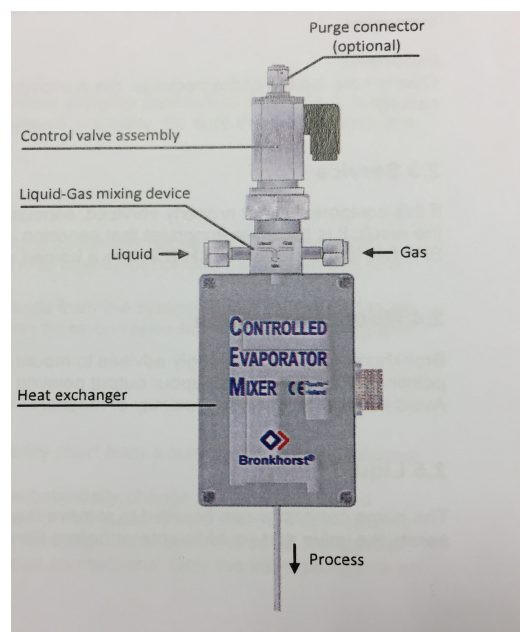


Figura 4.4. Composición del CEM.

En la figura se observa que el humidificador lleva incluido una válvula de purga. En caso de necesidad, el sistema está preparado para que se instale una toma de aire, procediendo así a la purgación.

Para el funcionamiento del humidificador, se precisa una entrada de agua. La instalación carece de entrada directa de agua, por el contrario, se ha optado por introducir un deposito de agua con una capacidad de 2L. Se utilizará agua destilada en toda la instalación, descartando el uso de agua ionizada. La cantidad de agua disponible en el deposito se verá a través de un tubo de llenado que reside en el exterior de la instalación. El deposito, de la marca *Festo*, está fabricado de acero inoxidable y puede albergar agua hasta una presión de 16 bar.



Figura 4.5. Deposito de agua alojado dentro del banco.

En combinación con “Controlled Evaporator Mixer”, se encuentra la unidad de control *Bronkhorst High-Tech*. Con ello se tiene acceso directo a los valores mostrados en pantalla, pudiendo en todo momento ser manipulados. Una de las variables en pantalla es la temperatura del intercambiador de calor.



Figura 4.6. Unidad de control *Bronkhorst* del CEM.

Para el control del flujo de gas para los elementos que componen los gases de escape, se han seleccionado caudalímetros F-201CV de serie “EL-FLOW” del fabricante BRONKHORST, resistentes a gases corrosivos y con un caudal máximo de gas de 25 l/min.



Figura 4.7. Caudalímetro Bronkhorst de serie “EL-FLOW” para gases hasta caudales de 25 l/min.

Asimismo, para los gases base o de transporte N₂/CO₂ y aire, se han implementado caudalímetros diferentes en sus respectivos circuitos. Debido a que los caudales solicitados serán de mayor magnitud, se han montado caudalímetros F-112AC de serie “EL-FLOW” de BRONKHORST, que permite caudales de hasta 250 l/min.



Figura 4.8. Caudalímetro Bronkhorst de serie “EL-FLOW” para gases hasta caudales de 250 l/min.

Para determinar el caudalímetro para el agua a usar, se tomó como referencia el caudal máximo de agua de 0.237kg/h. En el catalogo de BRONKHORST se optó por el caudalímetro M12 de la serie “mini CORI-FLOW”.



Figura 4.9. Caudalímetro Bronkhorst de serie “mini CORI-FLOW” para líquidos.

4.1.2.- Mezclador

El “Estatic Mixer” o mezclador, es el paso previo a la salida de la mezcla de gases del banco. Se definirá el sistema de mezcla de gases que permita garantizar la homogeneización de la mezcla gaseosa. A la salida del humidificador, el gas transporte húmedo entrará en el mezclador, donde se mezclará con el resto de gases. Durante esta etapa, la mezcla se homogenizará y tras ella, la mezcla estará completamente preparada para ser desviada hacia el reactor.

El diseño del mezclador ha sido estudiado a través de la expresión del número de Reynolds. Basándonos en la física de los gases, se ha derivado la expresión del número de Reynolds para seleccionar los parámetros críticos para garantizar que se alcanza un régimen turbulento dentro la tubería. Sabiendo que para un régimen turbulento, el número de Reynolds debe de ser elevado, los factores a tener en cuenta son; número de elementos perturbadores en el interior del mezclador y el diámetro de la tubería por la que trasiega el flujo.

Debido a ello, se ha optado por instalar un mezclador de tubo con aletas interiores, de acero-inoxidable (anticorrosivo) de la marca Cole-Parmer con el menor diámetro posible y el mayor número de aletas interiores disponible. A la entrada y salida del mezclador hay un termopar instalado (figura 4.10). La temperatura se muestra en el programa informático, pudiendo modificar el valor en todo momento.



Figura 4.10. Conducto del mezclador.

4.1.3.- Circuito de refrigeración y control de presión

El enfriador de mezcla de gases de escape se sitúa a la salida del reactor. Su principal función es reducir la temperatura de los gases de escape antes de que sean expulsados a la atmósfera, mediante el uso de un circuito de refrigeración por agua. En la figura 4.1 se muestra como "Circuito Agua Refrigeración". El enfriador tiene una entrada de agua, la cual usará para disminuir la temperatura de los gases de escape. Posteriormente los gases enfriados se desviarán al sistema de control de presión del circuito.



Figura 4.11. Circuito de refrigeración por agua.

Conectado con la salida del enfriador, la válvula de contrapresiones o panel de control de presión (figura 4.1), tiene por objetivo mantener la presión deseada en el circuito completo. Mediante el uso de una válvula de regulación, se asegura una presión específica en el circuito. Sin el uso de este sistema, la presión en el circuito sería atmosférica, no habría posibilidad de regularla. La válvula de control de presión expulsa los gases de escape finalmente.



Figura 4.12. Válvula de contrapresiones.

Ambos sistemas se muestran dentro de la instalación en la figura 4.1. Sin embargo, han sido desplazados del interior para instalarlos posteriormente en el interior de la campana de gases, donde habitarán junto con el reactor. Esto es debido a que ambas etapas van después del reactor y suponen la expulsión de la mezcla de gases del circuito, por lo que deben de permanecer en la campana de gases para la absorción la mezcla de gases sintéticos, sin depositar gases contaminantes a la atmosfera.

4.1.4.- Bombonas de gases

Las bombonas fueron seleccionadas de manera minuciosa en función de la cantidad que se necesita de cada elemento para simular los gases de escape. Debido a que los gases de escape de MCI se componen en aproximadamente un 75% de N₂, se ha optado por dar una entrada directa desde otro departamento del CMT. El mismo caso se ha dado para el aire sintético, lo que nos permite ahorrar espacio en el laboratorio y tener a disposición una mayor cantidad de aire sintético y nitrógeno en planta.



Figura 4.13. Suministro de nitrógeno y aire al generador desde otra instalación dentro del CMT.

Mientras tanto, para los demás componentes, se eligieron botellas de serie B10, con 2m³ de compuesto en el interior a una presión que oscila entre 150-200 bar. Para todas las bombonas, se ha trabajado con los catálogos de *Air Liquide*.



Figura 4.14. Bombonas de componentes minoritarios.

4.1.5.- Elementos de construcción y de seguridad

Manorreductores

Los manorreductores seleccionados con referencia PR-S HBSI 250-1-2 fueron extraídos de los catálogos de *Air Liquide*. Se escogieron manorreductores de doble etapa para poder reducir la presión de 200 a 10 aproximadamente, con una segunda etapa donde la presión de salida oscila entre 0.05 y 1 bar. Están fabricados de acero inoxidable para evitar el carácter corrosivo de los elementos manipulados.



Figura 4.15. Manorreductor de *Air Liquide* de doble etapa.

Conductos

Los conductos por los que trasegará la mezcla están fabricados de acero con 6mm de diámetro exterior y 4mm de diámetro interior. Para la conexión entre las bombonas y el propio banco se utilizarán tubos flexibles de teflón, con diámetro de 6mm y con un carácter anticorrosivo, para evitar accidentes a la hora de manipular los componentes.

Conectores

Se han elegido racores del fabricante *Swagelok* para conectar los diferentes módulos de manera rápida e independiente.

Colectores

La utilización de colectores permite concentrar todos los gases de una línea dando como resultado un único flujo de gases. Se tienen 4 líneas (línea de componentes, mezcla pobre, mezcla rica y línea de gas base) y para cada una de ellas se emplea un colector.

Línea de componentes: 6 entradas – 1 salida. Ref.: FDH1-CB-P0-M0-ZZ-0

Línea de mezcla pobre: Solo se necesita un conducto con O₂.

Línea de mezcla rica: 2 entradas – 1 salida. Ref.: FDH1-AA-P0-M0-ZZ-0

Línea de gas base: 3 entradas – 1 salida. Ref.: FDH1-AA-P0-M0-ZZ-0

Por último, se precisa un colector que reúna todos los flujos de la salida de los colectores anteriores y para que un solo flujo de gases sea dirigido hacia el mezclador. Se utilizará el colector FDH1-AA-P0-M0-ZZ-0 con 3 entradas y 1 salida.

Dispositivos de seguridad

En cada línea hay introducidas dos válvulas de seguridad del tipo todo/nada de *Swagelok* que permiten cerrar la instalación en caso de detección de una fuga de algún componente en uso o por necesidad de mantenimiento de la instalación. Además, un pulsador de parada de emergencia ha sido instalado en caso de urgencia.

Asimismo, se han instalado diversos sensores de gases en el laboratorio, que en caso de fuga de gas, el sensor correspondiente detectaría la fuga evitando malos mayores. Estas medidas son necesarias a la hora de garantizar la seguridad del operario de planta.



Figura 4.16. Disposición de válvulas todo/nada para cada una de las líneas, como también una parada de emergencia.



Figura 4.17. Sensores de NO y NO₂ en planta.

4.2.- Sistemas de control de la temperatura

El objetivo principal de la etapa de calentamiento del flujo es poder elevar la temperatura de la mezcla final hasta valores cercanos a 600°C, siendo capaces de mantener la temperatura de la mezcla alta y simular situaciones reales de los catalizadores en un vehículo.

El procedimiento de calentamiento del flujo de gases se realizará en dos etapas, habiendo una ya definida y teniendo que definir la segunda de las mismas. La primera de ellas tendrá lugar dentro del banco de ensayo mientras que para la segunda, se recurrirá a un sistema de calentamiento adyacente a la instalación, que permita elevar la temperatura en un orden de magnitud mayor a la que existe dentro del banco.

Los sistemas de calentamiento que se deben plantear incidirán sobre:

1. Mezcla dentro del banco de ensayo
2. Conducto entre banco y reactor
3. Reactor catalítico

Además de calentar la mezcla, para que se de un funcionamiento eficiente y conversión óptima de los elementos contaminantes, el monolito cerámico dentro del reactor catalítico debe de permanecer a una temperatura llamada temperatura de servicio. Para ello, se necesita un sistema para calentamiento que eleve la temperatura del monolito hasta un rango de temperaturas entre 500-600°C.

La primera etapa de calentamiento se basa en el calentamiento de la mezcla de gases mediante unas resistencias eléctricas. Directamente después del sistema de humidificación, la mezcla gas base-vapor entra en el mezclador donde se mezcla con el resto de reactivos que componen los gases de escape. Arrojando el propio mezclador, se encuentran las mantas eléctricas, que suministran energía en forma de calor de manera directa sobre la mezcla. Este sistema eleva la temperatura de los gases hasta un orden de 200°C y mantiene la mezcla a 200°C hasta la salida del generador.

Tras el estudio de los calentadores eléctricos montados para el tubo, se escogieron las mantas de la marca *Watlow*, con una potencia de 75W y una longitud de 38.1cm, lo que garantiza que los gases de escape saldrán a una temperatura de 200°C.

Las mantas eléctricas quedan instaladas de la siguiente manera alrededor del conducto del mezclador:

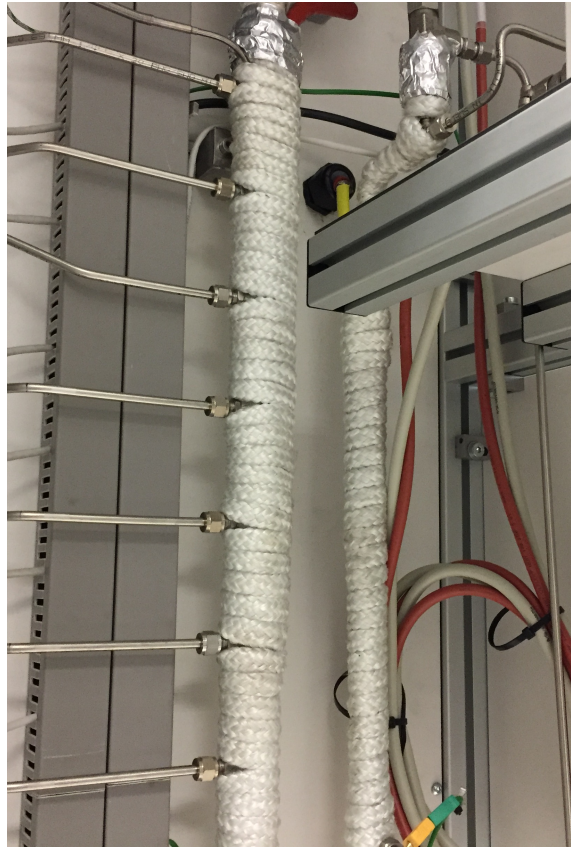


Figura 4.18. Sistema de mantas eléctricas enrolladas en el conducto del mezclador.

Tras el calentamiento de la mezcla mediante el sistema de mantas eléctricas, la mezcla de gases sintéticos se encuentra a una temperatura de 200°C, temperatura a la que saldrá del generador con dirección al reactor.

El segundo sistema de calentamiento se realizará fuera de la instalación. Sobre el conducto de conexión entre la salida del generador y la entrada del reactor incidirá el sistema de transmisión de calor que permita elevar la temperatura de la mezcla de gases de escape hasta 600°C.

El último sistema de calentamiento supone el más complicado de diseñar. El calentamiento del monolito no es sencillo debido a la complejidad de su estructura. Se analizarán los diferentes sistemas de calentamiento posibles y se elegirá el más apropiado y eficiente para el banco.

4.3.- Reactor

La tercera fase del banco de ensayos corresponde al reactor catalítico. El diseño mecánico y térmico del reactor será llevado a cabo para garantizar la resistencia térmica y mecánica al paso del flujo de gases, además de para estudiar su viabilidad para la posterior fabricación. El reactor tiene marcado como objetivo reducir las emisiones contaminantes de la mezcla de gases de escape.

El segundo objetivo es la construcción en conjunto con los demás dispositivos, de un banco de ensayo de emisiones totalmente controlado y con la capacidad de adaptarse a diferentes concentraciones de mezcla, sistemas de post-tratamiento, temperatura y necesidades del operario in situ. El reactor estará dimensionado para que dos substratos de zeolita se instalen en el interior, pero el diseño modular del prototipo permitirá que se puedan instalar varios substratos o sistemas de post-tratamiento en serie, pudiendo analizar en cada uno caso la efectividad de cada sobre los gases.

Las dimensiones del reactor vendrán supeditadas por el caudal de gases máximo que el banco de gases pueda generar. Este factor, unido a la velocidad espacial de los gases a través del monolito, determinarán el volumen y capacidad del reactor. En el diseño mecánico se tendrá en cuenta la máxima presión capaz de soportar el banco y la resistencia mecánica del material usado para corroborar que no se formarán deformaciones en la carcasa del reactor.

Para el análisis in situ de la mezcla y de la eficiencia de los substratos instalados en el interior, se instalarán sondas de muestreo, de óxidos de nitrógeno, de presión y termopares en el reactor que indiquen en todo momento el estado de la mezcla y muestree la mezcla antes y después de cada dispositivo de post-tratamiento.

El reactor se ubicará dentro de la campana de humos. Un conducto de acero inoxidable unirá la salida del generador con la entrada del reactor. Este a la vez estará conectado a la salida con el circuito de refrigeración (figura 4.1) que ha sido movido fuera de la instalación por cuestiones de accesibilidad.

4.4.- Análisis de la mezcla

El análisis de la mezcla no supone una etapa de nuestro banco de ensayos ya que el análisis de los gases se realiza de manera directa sobre el reactor, a través de sondas de medición. En cambio, es importante tener un control total de la mezcla en el banco y conseguir un sistema de análisis potente.

Para un correcto análisis, se precisa una maquina de lectura de composiciones de gases con salida a pantalla que muestre en todo momento la composición del gas allá donde se quiera analizar la mezcla. Para ello se dispone en el laboratorio de emisiones del CMT un analizador de gases MEXA-6000FT de la marca *Horiba*, capaz de analizar la composición de los gases mediante varias sondas de muestreo instaladas en el reactor.

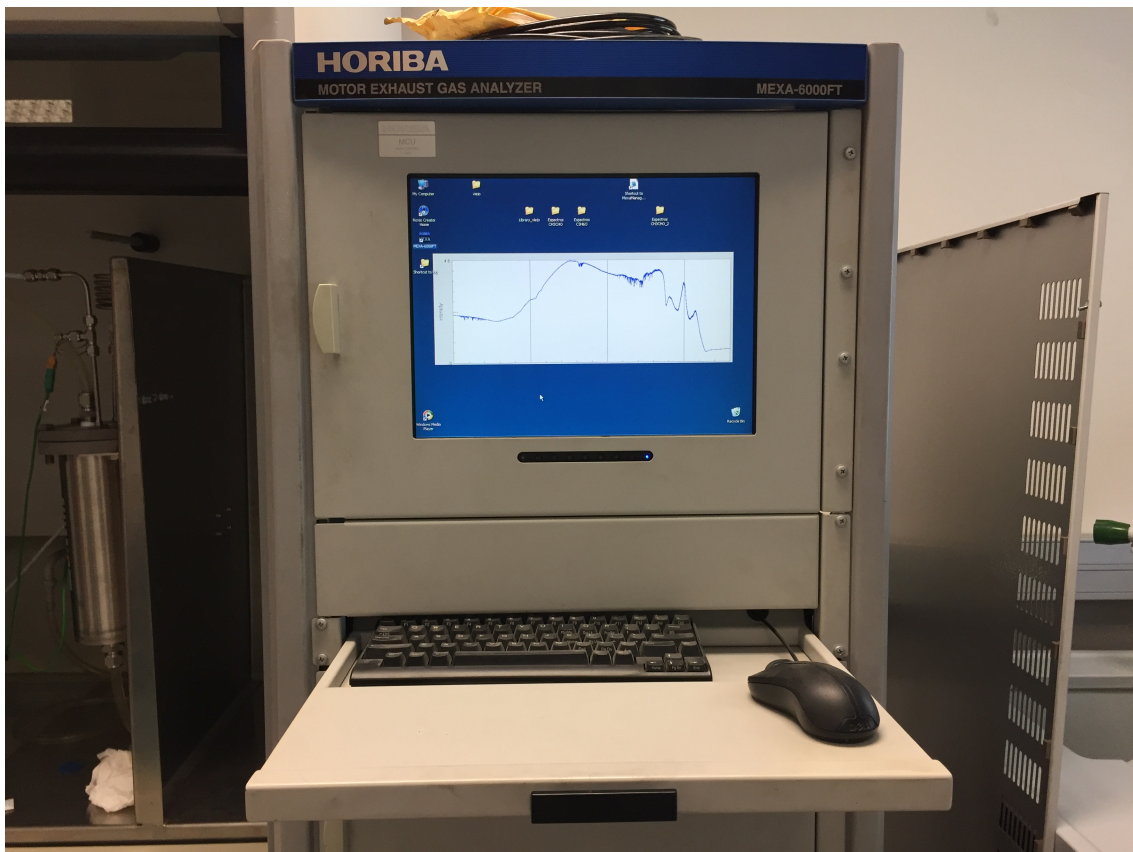


Figura 4.19. Analizador de gases de escape MEXA-6000FT disponible en planta.

Las sondas de muestreo irán instaladas antes y después de cada substrato, pudiendo ver directamente el efecto catalítico del post-tratamiento analizado sobre los contaminantes a examinar. Las sondas tienen una rosca de $\frac{1}{8}$ npt y están conectadas directamente con el MEXA-6000FT, que mediante el programa

informático se muestra en pantalla las concentraciones de los elementos que componen los gases de escape.

A continuación se mostrarán dos figuras, una representando a la sonda de muestreo y otra al interfaz del MEXA-6000FT.



Figura 4.20. Sonda de muestreo instalada en el reactor.



Figura 4.21. Interfaz del analizador Horiba MEXA-6000FT.

Los sensores de NO_x y oxígeno, quedarán instalados aguas arriba y aguas debajo del reactor, de tal manera que se pueda ver el efecto del sistema de post-tratamiento sobre ambos componentes. Se ha seleccionado la sonda MEXA-720 NO_x de la marca Horiba, cuya mayor ventaja es la medición simultánea de ambos parámetros sin necesidad de tener dos sensores independientes. Las sondas tienen una rosca de M14X1,5. Los valores de las concentraciones se muestran en pantalla, siendo posible mostrar la relación aire-combustible, el valor de lambda, el porcentaje de oxígeno presente en la mezcla y la concentración de NO_x en ppm. La selección del valor a representar en pantalla se puede hacer de manera dinámica en pantalla, como se muestra en la siguiente figura.

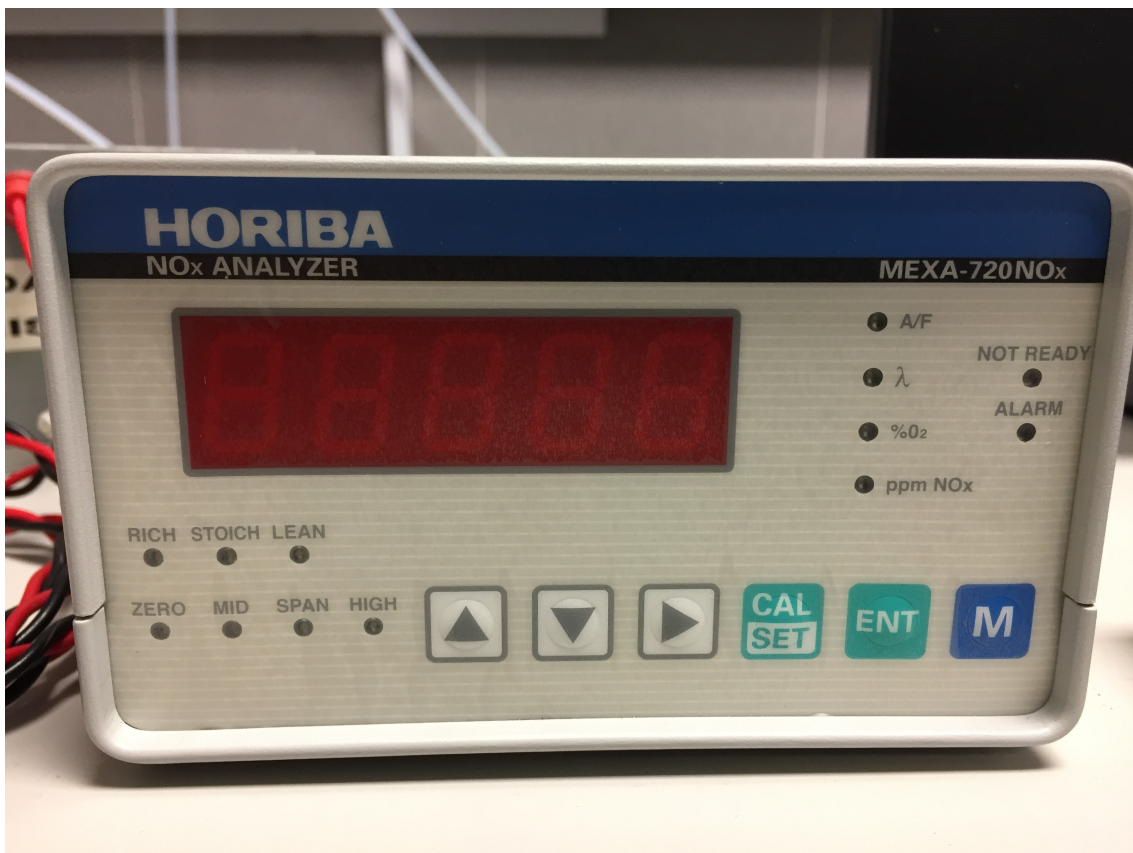


Figura 4.22. Analizador de NO_x y O_2 MEXA-720 NO_x .

Por último, se han añadido sensores de presión y termopares para controlar la temperatura y la presión dentro del reactor. El control de la temperatura y de la presión a la entrada del reactor es importante ya que tienen influencia directa sobre las reacciones en el interior del monolito. Los sensores de presión tienen roscas de $\frac{1}{8}$ npt, mientras que los termopares llevan propios casquillos hexagonales incluidos.



Figura 4.23. Termopar instalado en el reactor.

5.- Diseño del reactor

La tercera etapa del banco de ensayo corresponde al reactor donde se sitúa el sistema de post-tratamiento de gases de escape que se desee evaluar. El prototipado del reactor conllevará un análisis térmico y mecánico que verifiquen la resistencia frente a situaciones de estrés y altos gradientes de temperatura. La elección del material que conforma la carcasa del reactor y el diseño de la geometría estarán sujetos al diseño mecánico.

El objetivo global del banco es poder analizar el impacto que tienen los diferentes sistemas de post-tratamiento sobre los gases de escape de motores de combustión interna alternativos. En el interior del reactor se llevarán a cabo las reacciones de catálisis y la reducción de gases contaminantes, por lo que esta etapa es clave en el diseño de sistemas de post-tratamiento.

Los puntos a tener en cuenta en el diseño del reactor son:

1. Diseño mecánico
2. Diseño térmico
3. Definición del sistema de calentamiento

5.1.- Diseño mecánico

El punto de partida para el diseño del reactor es el dimensionado y la capacidad mecánica que debe tener el prototipo. Para dimensionar el reactor, hay que basarse en los parámetros que limitan su tamaño. Los parámetros a tener en cuenta a la hora de dimensionar son:

1. Caudal de gases máximo que debe pasar por el monolito
2. Dimensiones del monolito
3. Tiempo de residencia de los gases en el monolito

El caudal de gases que atraviesa el monolito debe garantizar que el gas permanece suficiente tiempo dentro del reactor para que se produzcan las reacciones químicas. A este tiempo se le llama tiempo de residencia de los gases.

Para poder calcular y dimensionar el reactor, se debe trabajar con el caudal máximo que el banco de gases puede generar, siendo este el primero de los

parámetros limitantes a la hora de diseñar el reactor. Además del caudal máximo, el volumen de monolito será otro factor limitante, teniendo influencia directa sobre el tiempo de residencia de los gases de escape. La relación entre caudal de gases y volumen del monolito se le denomina velocidad espacial del flujo. Para los sistemas de post-tratamiento actuales este parámetro tiene un valor máximo de $150000h^{-1}$, lo que garantiza que el fluido permanece tiempo suficiente en contacto con la superficie activa del monolito como para que las reacciones ocurran y se consiga el objetivo de disminuir las emisiones.

5.1.1.- Dimensionado del monolito

La instalación de gases fue diseñada para generar un caudal de gases máximo de 150 l/min. Se diseñó de tal manera que a la hora de poner el banco en funcionamiento, no se tuviese que tratar con grandes volúmenes de gases, lo cual conllevaría un gasto económico muy elevado, algo innecesario. Por ello, el reactor a diseñar tendrá que utilizar monolitos de tamaño reducido.

Como ya se ha mencionado, el volumen del monolito a utilizar dependerá del caudal de gases máximo y de la velocidad espacial del flujo en el interior. Estableciendo la relación entre caudal y velocidad espacial, se halla el volumen de monolito mínimo necesario.

$$s = \frac{\dot{V}}{v} \leq 150 * 10^3 h^{-1}$$

$$v = \frac{\dot{V}}{s}$$

s: velocidad espacial (h^{-1})

v: volumen del monolito (m^3)

\dot{V} : caudal de gas ($\frac{m^3}{min}$)

$$\dot{V} = 150 \frac{l}{min} * \frac{10^{-3} m^3}{1 l} * \frac{60 mins}{1 h} = 9 \frac{m^3}{h}$$

El volumen mínimo de monolito a utilizar será de:

$$v = \frac{9}{150 * 10^3} = 6 * 10^{-5} m^3$$

Por lo tanto, el volumen del monolito debe de ser $\geq 6 * 10^{-5} m^3$. Teniendo en cuenta las dimensiones habituales de monolitos reales ($\varnothing \approx 250mm$ y $L \approx 200mm$) se decidió utilizar monolitos de 40mm en diámetro y 50mm de longitud, los cuales se obtendrán mediante el mecanizado de monolitos estándar. Para verificar que estos monolitos a escala cumplen con los requisitos, se calcula la velocidad nuevamente.

$$v = \pi * \frac{(40 * 10^{-3})^2}{4} * 50 * 10^{-3} = 6,283 * 10^{-5} m^3$$

$$s = \frac{9}{6,283 * 10^{-5}} = 143243 h^{-1}$$

Se puede afirmar que las dimensiones seleccionadas para el monolito cumplen con ambos parámetros y se garantiza de esta manera que el flujo de gases permanecerá tiempo suficiente dentro del monolito para que las reacciones químicas se lleven a cabo de manera satisfactoria.

5.1.2.- Dimensionado del reactor

El dimensionado del reactor se llevará a cabo basándose en los parámetros limitantes de volumen. El reactor se adecuará a las dimensiones del monolito seleccionado y al correspondiente caudal de mezcla de gases. Además de ello, el dimensionado del reactor conlleva hacer un diseño geométrico y posterior análisis mecánico de la geometría definida.

El reactor se compondrá de tres módulos; de entrada, de salida y de un módulo central de soporte, de tal manera que el reactor se conformará:

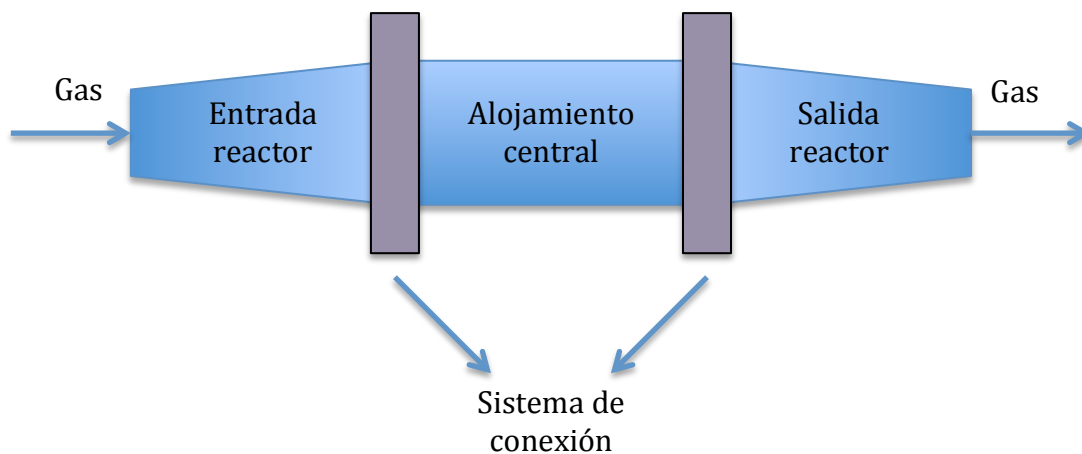


Figura 5.1. Disposición módulos del reactor.

El soporte central será donde se alojen los substratos o monolitos de los sistemas de post-tratamientos a analizar. Se dimensionará la longitud y el diámetro del tubo en función del volumen del monolito y el número de monolitos en serie que se quieran insertar (figura 5.1). Para el diseño, el dimensionado se basará en la disposición dos monolitos en serie. Siendo cada monolito de 50mm de longitud, esto supone que el alojamiento debe de tener al menos 100mm de longitud. Entre los substratos se han añadido dos casquillos para sondas de muestreo que permitan extraer y analizar la mezcla de gases de tras la catálisis. Las sondas extraerán muestra de gas para ser analizada, obteniendo tras cada monolito, la eficiencia del dispositivo. Sabiendo que el diámetro de cada casquillo es de 14mm, la longitud del alojamiento central será $\geq 128\text{mm}$.

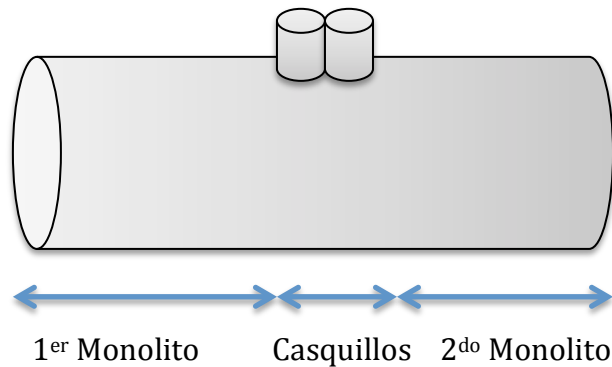


Figura 5.2. Esquema del módulo central.

El diseño modular implica que se puedan acoplar alojamientos centrales donde habiten dos, tres o más monolitos. Para ello, se establece una regla para dimensionar los tubos en caso de añadir más monolitos. Si para alojar dos monolitos se necesitan 128mm de tubo, para alojar tres y cuatro se necesitarán:

$$3 \text{ monolitos: } 128\text{mm} + 50\text{mm} + 14\text{mm} + 14\text{mm} = 206\text{mm}$$

$$4 \text{ monolitos: } 206\text{mm} + 50\text{mm} + 14\text{mm} + 14\text{mm} = 284\text{mm}$$

El alojamiento central podrá ser modificado en función de las necesidades del usuario. El tubo estará fabricado de acero inoxidable AISI 316L, con un rango alto de resistencia a la tensión, alta resistencia a temperaturas elevadas y buena resistencia a la corrosión. El espesor del tubo será de 1,5mm y tendrá 50mm de diámetro interior.

El diseño modular del reactor permitirá analizar el comportamiento de la mezcla de gases ante varios sistemas de post-tratamiento montados en serie. El tubo soporte está dimensionado para que se instalen dos monolitos, pero el

reactor debe de estar preparado para que se pueda cambiar el tubo soporte e insertar uno de mayor tamaño, pudiendo así adaptar el reactor a diferentes sistemas de post-tratamiento. Para ello, la conexión con los módulos de entrada y salida del reactor tiene que ser sencilla y ajustable a la necesidades del banco. Por ello, se optará por montar abrazaderas de tipo clamp de conexión rápida. Las conexiones permitirán cambiar el tubo soporte conforme se desee, lo cual permite ahorrar tiempo y darle mayor funcionalidad al reactor. Se ha trabajado con los catálogos del fabricante *Quilinox*, de donde se seleccionarán las abrazaderas que aparecen en la figura 5.1.

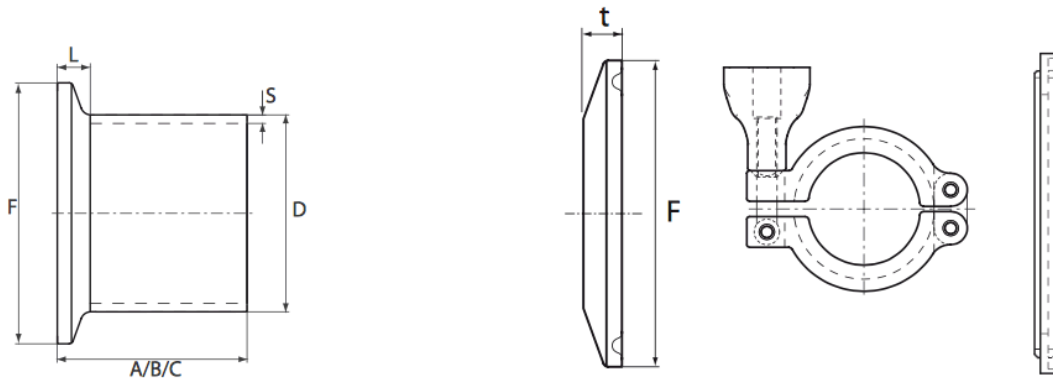


Figura 5.3. Plano de abrazaderas y conexiones clamp.

METRIC										
NW	Tube size d x s mm	F	L	Ferrules			Caps		Clamps	Gaskets*
				A	B	C	t	F	Size	
10	13.00 x 1.50	34.00	6.70	28.60	18.00		6.35	34.00	0	13.00
15	19.00 x 1.50	34.00	5.60	28.60	18.00		6.35	34.00	0	19.00
20	23.00 x 1.50	34.00	4.90	28.60	18.00		6.35	34.00	0	23.00
25	29.00 x 1.50	50.50	6.80	36.00	21.50		6.35	50.50	2	29.00
32	35.00 x 1.50	50.50	5.70	36.00	21.50		6.35	50.50	2	35.00
40	41.00 x 1.50	50.50	4.60	36.00	21.50		6.35	50.50	2	41.00
50	53.00 x 1.50	64.00	4.90	36.00	21.50		6.35	64.00	3	53.00
65	70.00 x 2.00	91.00	6.70	48.00	28.00		6.35	91.00	5	70.00
80	85.00 x 2.00	106.00	6.70	48.00	28.00		6.35	106.00	6	85.00
100	104.00 x 2.00	119.00	5.60	48.00	28.00		8.00	119.00	7	104.00
150	154.00 x 2.00	183.00	10.90	66.00	28.00		14.00	183.00	10	154.00

Tabla 5.1. Dimensiones para las abrazaderas y conexiones de escala métrica.

Siendo el tubo soporte de 53mm y 1,5 mm de espesor, se optará por montar la medida métrica NW50. A cada extremo del tubo soporte irá soldada una conexión clamp NW50. Además cada módulo de entrada y salida del reactor llevará en uno de los extremos una conexión clamp soldada, que permanecerá en contacto con la del tubo soporte.

El tubo de salida del generador de gases es de $\varnothing = 8mm$, misma sección que a la entrada del reactor. El diámetro de salida del módulo de entrada tiene 50mm, por lo que es necesario que el acoplamiento entre estos elementos sea progresivo para evitar que se generen turbulencias a la entrada del reactor y afecte directamente a las sondas de medición.

Para los tramos de reducción, se utilizaron el catálogo catálogos de Quilinox para reducciones de acero inoxidable AISI 316L.

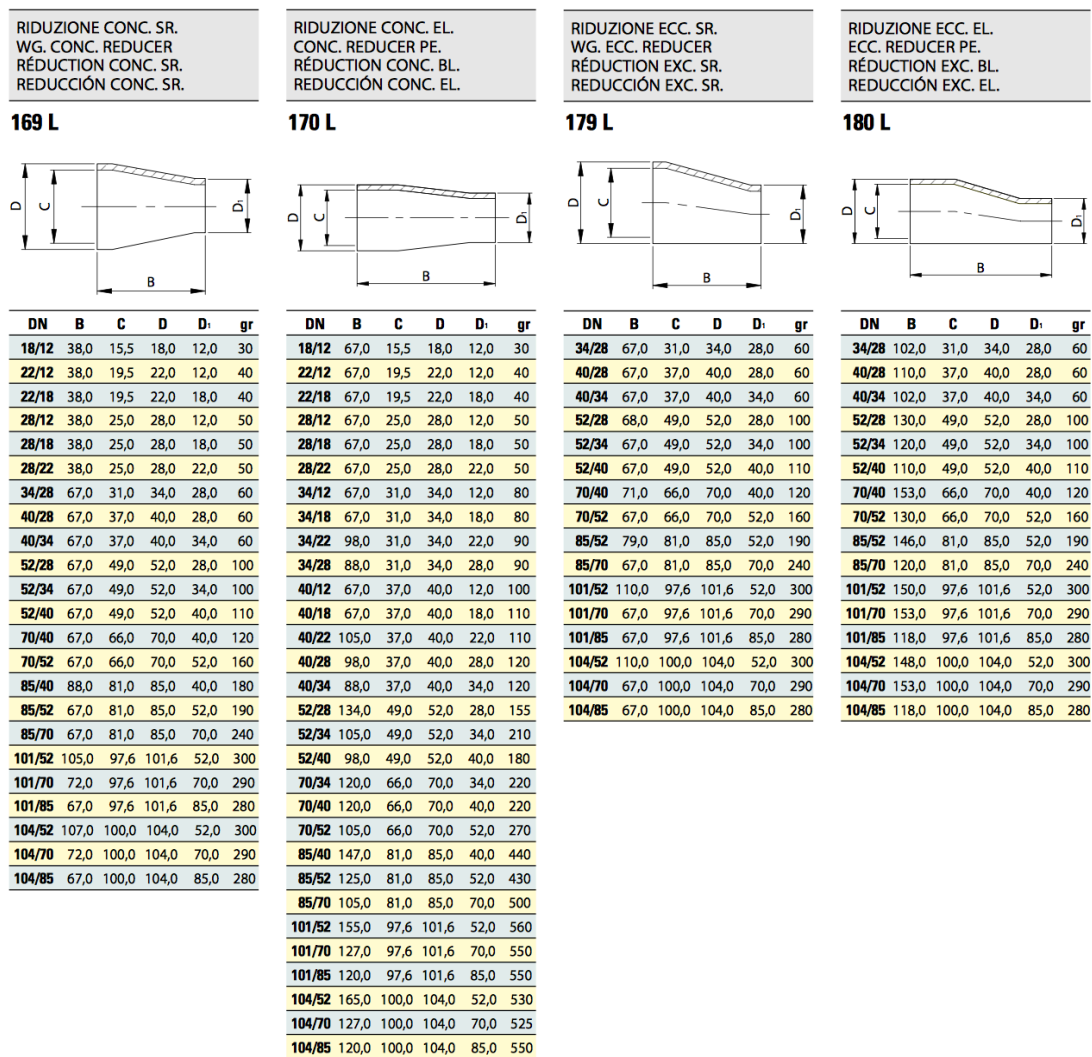


Figura 5.4. Catálogo de reducciones del fabricante Quilinox.

Por geometría, las reducciones 169L son las más adecuadas, ya que el aumento de la sección es progresivo y lineal, de manera que el flujo no sufre grandes cambios que puedan generar remolinos en el interior del tubo. La reducción más pequeña en este caso es la 25/12, que acopla perfectamente con el tubo de entrada al reactor.

Una vez se tiene la primera reducción, se acoplará un tubo de sección constante de 25mm de diámetro interior y 1,5mm de espesor. Este tubo tiene fundamentalmente dos funciones: la primera mantener la estabilidad del flujo y la segunda, servir de soporte par colocar diferentes instrumentos de medida para evaluar los gases. Sobre la parte superior del tubo irán dos casquillos de M14X1,5 donde se acoplarán un sensor de oxígeno y un sensor de óxidos de nitrógeno. Además, habrá un casquillo de 1/8npt de acople para un sensor de presión.

Finalmente, la última reducción de paso se realizará de la misma manera que la primera. Se utilizaron los catálogos de Quilinox.

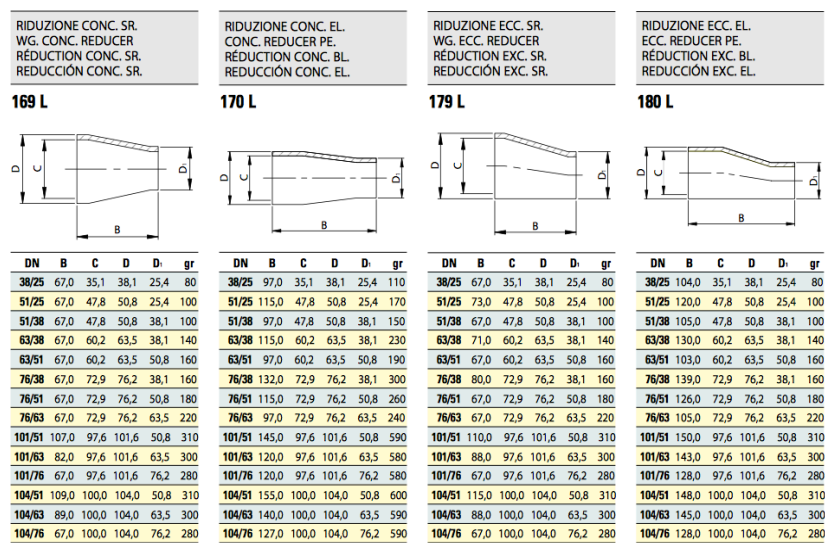


Figura 5.5. Catálogo de reducciones del fabricante Quilinox (1).

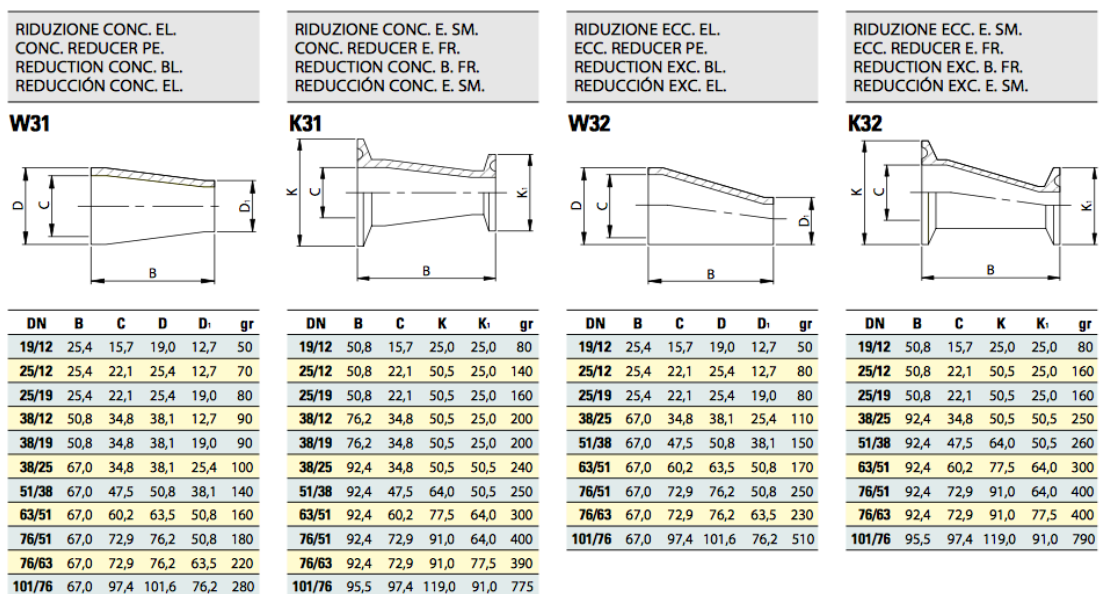


Figura 5.6. Catálogo de reducciones del fabricante Quilinox (2).

Basándose en los de tipo 169 L, la reducción a emplear será la de 51/25. Con esta reducción se consigue disminuir el diámetro de paso a la mitad de forma progresiva, ya que la longitud de la reducción es de 25mm y supone una reducción de 1mm de sección por milímetro de longitud.

Por lo tanto, los módulos de entrada y salida quedan definidos de la siguiente manera:

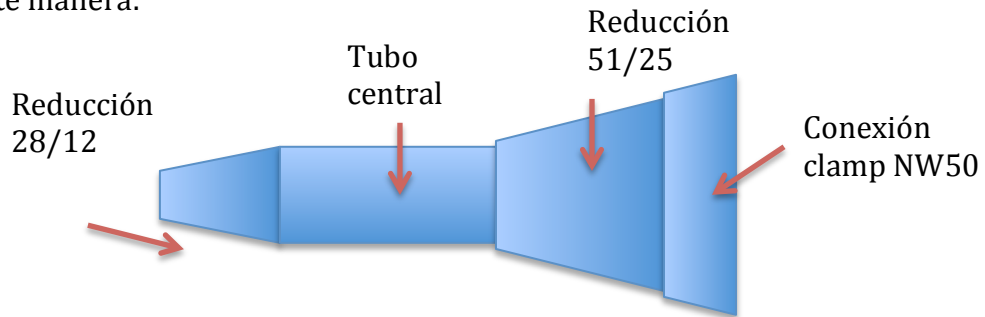


Figura 5.7. Configuración de los módulos de entrada y salida del reactor.

5.2.- Diseño térmico

Tanto los gases de escape como el monolito cerámico deben de estar a una temperatura óptima para que el rendimiento de conversión de contaminantes en el sistema de post-tratamiento sea elevado. A bajas temperaturas, ya sea de los gases o/y del monolito, la eficiencia de los tratamientos catalíticos disminuye mucho. Debido a ello, para realizar estudios de catálisis en el reactor es necesario poder simular diferentes condiciones térmicas.

En su funcionamiento habitual, en los MCIA tanto los catalizadores, como los gases de escape de los motores sufren cambios bruscos de temperatura y presión. Se ha previsto poder simular 4 situaciones térmicas a la hora de evaluar un sistema de post-tratamiento, las cuales son:

1. Gases fríos – Monolito frío: caracteriza el momento de arranque del motor
2. Gases fríos – Monolito caliente: caracteriza una parada corta del motor y posterior arranque y marcha en vacío (ralentí).
3. Gases calientes – Monolito frío: arranque del motor en frío y aceleración rápida.
4. Gases calientes – Monolito caliente: Funcionamiento en régimen estacionario de media y alta carga.

El generador de gases eleva la temperatura de los gases hasta un valor máximo de 200°C, temperatura a la que se considera gas frío. Por lo cual, la simulación de gases fríos ya se cumple de esta manera. De la misma manera, a la hora de trabajar con el monolito frío, se asume que está a temperatura ambiente, 15-25°C,. Se considera que está frío bajo estas condiciones. Sabiendo que estos casos no requieren de un sistema de enfriamiento, el estudio térmico se realizará para la selección de un sistema de calentamiento de la mezcla de gases y del monolito.

Para tener la capacidad de simular situaciones de temperaturas elevadas, se emplearán dos sistemas de calentamiento; uno que incida sobre la mezcla de gases y otro sobre el monolito.

5.2.1.- Sistema de calentamiento para la mezcla de gases

El primer sistema de calentamiento hará incidencia sobre el tubo de acero inoxidable por el que los gases se transportarán desde la salida del generador de gases hasta el reactor. El objetivo será elevar la temperatura desde 200°C a 600°C.

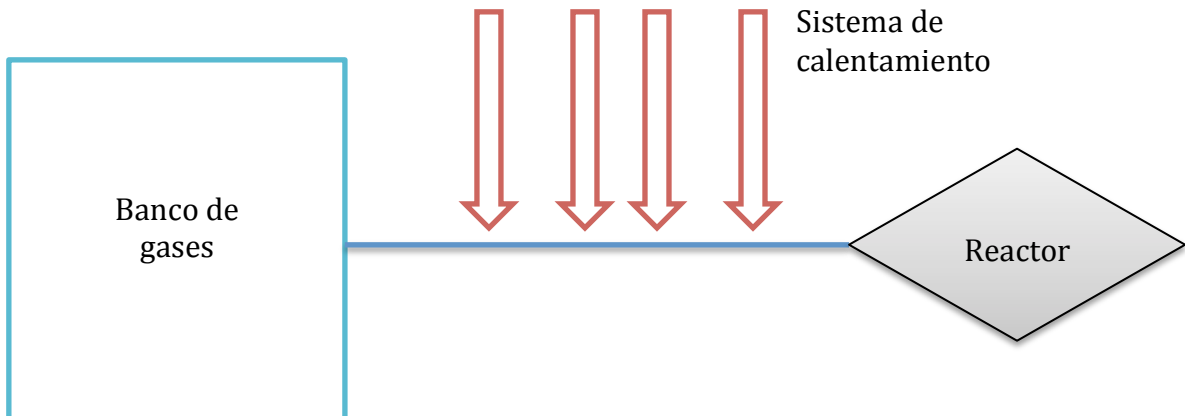


Figura 5.8. Acoplamiento del sistema de calentamiento en el banco de ensayos.

Para el cálculo térmico se ha asumido que el gas que se trasiega por el conducto es nitrógeno, ya que este será el gas base y la mezcla se compondrá en un 75% de nitrógeno. Con esta suposición se simplifica el problema a resolver. La situación en el tubo será la siguiente:

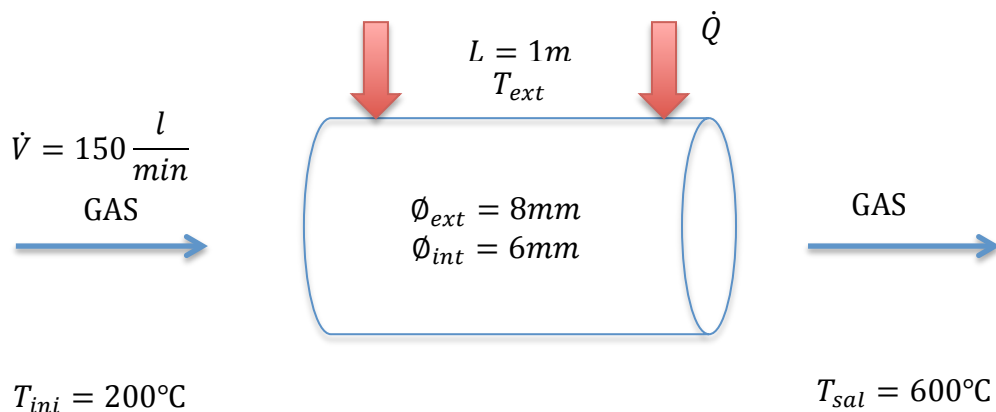


Figura 5.9. Esquema térmico en el interior del tubo.

Lo primero a tener en cuenta es el balance energético dentro del tubo. La potencia a suministrar será la absorbida por los gases, considerando la

transmisión de calor por convección y conducción. La potencia térmica absorbida por los gases será:

$$\dot{Q}_{gas} = \dot{m} * c_p * (T_{sal} - T_{ini}) \quad (5.1)$$

Siendo \dot{m} el gasto másico máximo de gases; c_p el calor específico de la mezcla; y $(T_{sal} - T_{ini})$ la diferencia de temperatura entre la entrada y salida del conducto.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{gas} &= 1 * 150 * \frac{10^{-3}}{60} * 1,093 * (600 - 200) = \\ &= 1,093 \text{ KW} \approx 1,1 \text{ KW} \end{aligned}$$

La potencia que absorben los gases será la mínima potencia a suministrar por el sistema de calentamiento. Si la transmisión de calor fuese del 100%, toda la energía aportada por el sistema de calentamiento sería absorbida por la mezcla de gases. En cambio, la transmisión de calor a través del tubo conlleva la pérdida de calor por conducción y convección. Debido a ello, se plantea el cálculo de la potencia del sistema de calentamiento mediante la siguiente fórmula:

$$\dot{Q}_{cal} = \dot{Q}_{gas} + \sum \dot{Q}_{perdidas} \quad (5.2)$$

El sumatorio de pérdidas de calor a través del conducto será la suma de la transmisión de calor de las tres situaciones siguientes:

1. Convección natural entre el aire y la pared exterior del conducto
2. Conducción térmica a través del tubo de acero
3. Convección forzada en la pared interior del tubo

Se supone que en la transmisión de calor por convección natural en el exterior del tubo será del 100%, por lo que no existirán pérdidas de energía debido a la interacción entre el aire y la pared exterior del conducto. En el interior del conducto por la transmisión de calor será por conducción en la pared y convección forzada entre el tubo y el gas.

- Transmisión de calor por conducción:

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{k * A}{e} * \Delta T \quad (5.3)$$

Donde k representa la conductividad térmica del material del tubo, en este caso acero inoxidable; A la superficie del contacto; e el espesor del conducto; y ΔT la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior del conducto.

- Transmisión de calor por convección:

$$\dot{Q}_{conv} = h * A * DTML \quad (5.4)$$

Siendo h el coeficiente de película, A la superficie de contacto y $DTML$ la diferencia de temperatura media logarítmica, definida como:

$$DTML = \frac{(T_{ext} - T_{ini}) - (T_{ext} - T_{sal})}{\ln\left(\frac{T_{ext} - T_{ini}}{T_{ext} - T_{sal}}\right)}$$

Para el cálculo de $DTML$ se necesita la temperatura exterior, es decir, la temperatura a la que estará el horno. Se supondrá una temperatura de 1000°C , que será la temperatura máxima de diseño. Para la definición de la superficie de contacto, A , se tomará el área de conducto que estará en contacto con la atmosfera del horno. Por lo tanto, la superficie de contacto será:

$$A = \pi * \phi * L$$

Donde la longitud del conducto, L , que quedará definida como $1m$, por limitaciones de espacio en el banco de ensayo.

Por el contrario, para el cálculo de la pérdida de potencia por convección se precisa el valor del coeficiente de película, h , el cual cuantifica la interacción existente entre la pared y el flujo de gas en el interior del conducto. El coeficiente de película se define como:

$$h = \frac{Nu * k_{flujo}}{\phi_{int}} \quad (5.5)$$

Donde k_{flujo} es la conductividad térmica del gas y Nu corresponde al número adimensional de Nusselt. El valor de k_{flujo} queda definido mediante el uso de tablas de propiedades térmicas. En cambio, el valor de Nusselt queda definido mediante la ecuación de Diltus-Bolter.

$$Nu = 0,023 * Re^{0,8} * Pr^n \quad (5.6)$$

El valor de n dependerá de si el flujo de gases se calienta o se enfría en su paso por el tubo. El número de Reynolds (Re) es un número adimensional que

caracteriza el flujo en función de su régimen transitorio. El número de Prandlt, Pr , establece la relación entre el componente cortante de la difusividad del momento y la difusividad térmica. Para el cálculo de ambos parámetros se utilizan las siguientes expresiones:

$$Re = \frac{4 * \rho * \dot{V}}{\pi * \phi_{int} * \mu} \quad (5.7)$$

$$Pr = \frac{c_p * \mu}{k_{flujo}} \quad (5.8)$$

Tanto Re como Pr quedan definidos por parámetros que dependen de la temperatura, presión del flujo y de la geometría del conducto. En la tabla 5.2 se muestran algunas propiedades del N_2 en función de su temperatura y a una presión máxima del banco de 2 bar.

Temperatura (°C)	Presión (bar)	Densidad ρ ($\frac{kg}{m^3}$)	Viscosidad dinámica μ ($Pa * s$)	C_p ($\frac{J}{kgK}$)	Conductividad térmica k ($\frac{W}{mK}$)
200	2	1.423	$2.482 * 10^{-5}$	1054	0.03759
400	2	1.000	$3.115 * 10^{-5}$	1093	0.04953
600	2	0.771	$3.745 * 10^{-5}$	1141	0.06123

Tabla 5.2. Propiedades del nitrógeno a diferentes temperaturas.

Para el cálculo de los parámetros anteriormente mencionados se utilizarán las propiedades del nitrógeno a 400°C, siendo esta la temperatura media entre la salida y entrada del gas por el conducto. Sustituyendo los valores de la tabla, se calcula Re y Pr .

$$Re = 17031$$

$$Pr = 0.687$$

Siendo el número de Reynolds mayor a 2300, se afirma que el fluido es turbulento. Una vez calculados ambos parámetros, se calcula el número de Nusselt. El valor del exponente n depende de si el fluido se calienta o se enfría, tomando 0,4 en el caso de calentarse y 0,3 en caso contrario. Por lo que, en este caso $n=0,4$ y por tanto, Nu será:

$$Nu = 48.03$$

Sabiendo el valor de Nu, se procede al cálculo del coeficiente de transmisión de calor por convección h .

$$h = 396.49 \frac{W}{m^2 K}$$

Una vez calculado el valor del coeficiente de película, se procede a realizar el cálculo de la transmisión de calor por conducción y por convección.

En primera instancia, se calcula DTML:

$$DTML = \frac{(1000 - 200) - (1000 - 600)}{\ln\left(\frac{1000 - 200}{1000 - 600}\right)} = 577,08 K$$

Para el cálculo del calor transferido por conducción, el valor para k de $50,2 \frac{W}{mK}$ ha sido extraído de las tablas de propiedades térmicas del acero inoxidable.

Por lo cual, la energía térmica por conducción y convección será:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{cond} &= \frac{50,2 * \pi * 8 * 10^{-3} * 1}{1 * 10^{-3}} * (1000 - 200) = \\ &= 1009330 W = \mathbf{1,01 MW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{conv} &= 396,49 * \pi * 6 * 10^{-3} * 1 * 577,08 = \\ &= 4.312,90 = \mathbf{4,3 KW} \end{aligned}$$

La transmisión de calor por conducción de $\approx 1MW$ refleja que el sistema no pierde calor por la transmisión por conducción, dado que el espesor de la tubería es muy pequeño y el material tiene una conductividad térmica elevada. Debido a ello, se ha decidido despreciar la pérdida de calor por conducción y se asume que la temperatura de la pared interior del tubo permanecerá a la misma temperatura que el exterior del tubo.

Por el contrario, la potencia térmica transmitida por convección es de $4,3KW$ indica que la transmisión de calor al gas es mayor al necesario para calentar el gas hasta $600^{\circ}C$ ($\dot{Q}_{gas} = 1,1KW$). El planteamiento implica que la temperatura de salida del gas sería $\geq 600^{\circ}C$. Dada la situación, se plantean dos posibilidades: variar la temperatura exterior proporcionada por el sistema de calentamiento; o acortar la longitud del conducto. Se procede al planteamiento de las dos posibilidades y así obtener la potencia necesaria.

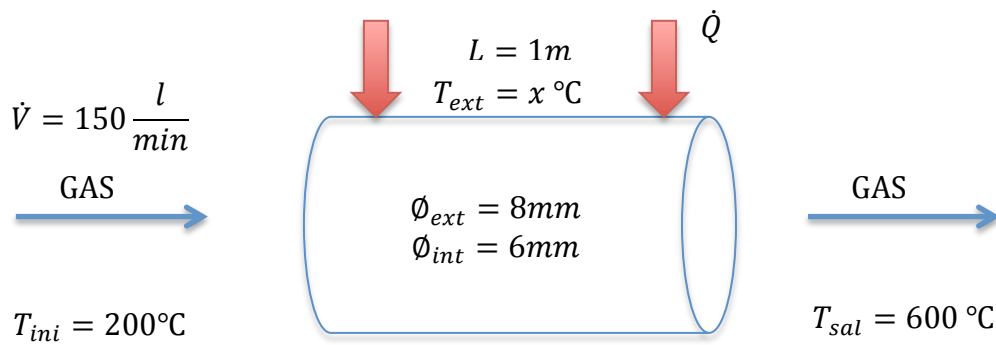


Figura 5.11. Esquema térmico para la primera posibilidad planteada.

Se tiene un conducto de 1m expuesto a una temperatura de pared exterior desconocida. El gas entra a una temperatura de 200°C y sale a 600°C.

La ecuación a plantear será la equivalencia entre la potencia que absorben los gases y la potencia de transmisión de calor por convección:

$$\dot{m} * c_p * (T_{sal} - T_{ini}) = h * A * DTML \quad (5.9)$$

Para caracterizar el fluido se utilizarán las propiedades anteriormente calculadas para el nitrógeno a 400°C. Para obtener el valor de la temperatura de la pared, se necesita calcular el DTML y despejar la temperatura de pared a partir de ahí. El DTML será:

$$DTML = \frac{\dot{V} * \rho * c_p * (T_{sal} - T_{ini})}{h * A} \quad (5.10)$$

$$DTML = 146,25$$

Siendo DTML:

$$\frac{(T_{ext} - 200) - (T_{ext} - 600)}{\ln\left(\frac{(T_{ext} - 200)}{(T_{ext} - 600)}\right)} = 146,25$$

Despejando la temperatura de la pared exterior se obtiene:

$$T_{ext} = 627,76 \text{ °C}$$

Por lo que, para que el gas eleve su temperatura hasta 600°C, a lo largo de un conducto de 1m, la temperatura de la pared será $\geq 627,76^\circ\text{C}$.

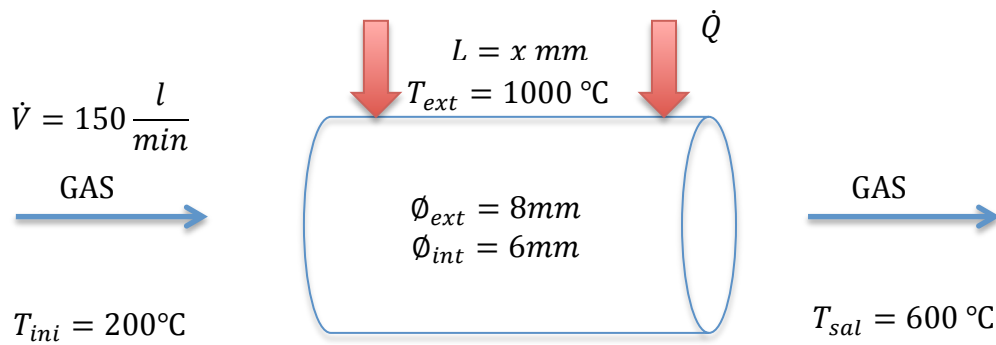


Figura 5.12. Esquema térmico para la segunda posibilidad planteada.

El segundo caso a estudiar conlleva el cálculo de la longitud del conducto. En este caso, se supone la temperatura proporcionada por el horno de 1000°C y con la variación de temperatura para el gas idéntica al caso anterior. El objetivo es encontrar la longitud del conducto L para esta situación térmica.

En primera instancia se plantea el mismo balance térmico que en el caso anterior:

$$\dot{Q}_{gas} = \dot{Q}_{conv}$$

$$\dot{V} * \rho * c_p * (T_{sal} - T_{ini}) = h * \pi * \phi_{int} * L * DTML \quad (5.11)$$

Donde L será la incógnita a despejar de la ecuación. Conociendo los valores del coeficiente de película y $DTML$:

$$h = 396,49 \frac{W}{m^2K}$$

$$DTML = 577,08 K$$

Se despeja la longitud del conducto de la expresión 5.11:


$$L = \frac{\dot{V} * \rho * c_p * (T_{sal} - T_{ini})}{h * \pi * \phi_{int} * DTML} = 0,253 m = 25,3 cm$$

Se puede afirmar que, para que el gas eleve su temperatura hasta 600°C, a lo largo de un conducto con una temperatura de pared exterior de 1000°C, la longitud del conducto será $\geq 25,3 cm$.

Selección del sistema de calentamiento

Para la selección del sistema de calentamiento final se basará en hornos tubulares de disposición horizontal, capaces de albergar conductos de 8mm de diámetro exterior en su interior. La elección del horno dependerá de las ofertas, pudiendo escoger un horno con mayor potencia y menor longitud o viceversa. En función de lo ofertado, polivalencia del sistema y tamaño disponible en el banco, se elegirá de un tipo o de otro.

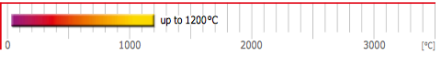
Los catálogos con los que se trabajaran para la selección del horno serán de la marca Carbolite.



Universal Tube Furnaces

56

EHA, EHC, EVA, EVC – Compact Tube Furnaces




The compact EHA, EHC horizontal and EVA, EVC vertical compact tube furnaces use free radiating wire elements embedded within the insulation of the furnace body. The benefit of this design is its flexibility; with the use of tube adapters the same furnace can be used with a variety of tube diameters. The EHA and EVA are single zone furnaces and the EHC and EVC are three zone furnaces.

This range of tube furnaces does not include an integral work tube and one must be selected as an additional item. The work tube length is dependent on the application e.g. for use with modified atmosphere or vacuum; this information can be found on pages 104 – 105.

The use of a separate work tube has the advantage of protecting the heating elements from damage or contamination.

Standard features

- 1200 °C maximum operating temperature
- Carbolite Gero 301 digital PID controller with single ramp to setpoint and process timer
- Heated lengths, single zone 150, 300, 450 or 600 mm (EHA, EVA)
- Heated lengths, 3-zone 450 and 600 mm (EHC, EVC)
- Accepts work tubes with outer diameters up to 60 mm
- Wire elements in high quality vacuum formed insulation ensure fast heat up, excellent temperature uniformity and short cool down times
- Horizontal configuration (EHA, EHC)
- Vertical configuration (can also be used horizontally – EVA, EVC)
- Control module with 2 metre conduit to furnace (EVA, EVC)
- Outer mesh guard ensures operator safety



EHA 12/150

Options (specify these at time of order)

- A range of sophisticated digital controllers, multi-segment programmers and data loggers is available. These can be fitted with RS232, RS485 or Ethernet communications (see pages 100 – 103)
- Over-temperature protection (recommended to protect valuable contents & for unattended operation)
- A range of additional work tubes (pages 104 – 105), end seals (page 108) and work tube packages (pages 106 – 107) is available for use with modified atmosphere and/or vacuum
- Vacuum packages with a choice of rotary vane pump or turbomolecular pump are available (page 110)
- Angle adjustment option allows horizontal and multi-angle configuration (EVA, EVC)
- Wide choice of tube diameters and materials is available. See pages 104 – 105 for tube materials and dimensions
- Insulation plugs and radiation shields to prevent heat loss and improve uniformity

Figura 5.10. Catalogo de Carbolite.

Technical data											
CGH	Max. temp. [°C]	Heat up time [mins]	Dimensions: Max. outer ϕ accessory tube [mm]	Heated length [mm]	Tube length for use in air [mm]	Tube length for use with modified atmosphere [mm]	Dimensions: External H x W x D [mm]	Uniform length $\pm 5^\circ\text{C}$ [mm]	Max. power [W]	Thermocouple Type	Weight [kg]
Single Zone Horizontal Compact Tube Furnaces EHA											
EHA 12/150B	1200	46	60	150	300	600	560 x 370 x 390	80	750	N	15
EHA 12/300B	1200	34	60	300	450	750	560 x 465 x 390	185	1480	N	17
EHA 12/450B	1200	44	60	450	600	900	560 x 615 x 390	300	2000	N	19
EHA 12/600B	1200	45	60	600	750	1050	560 x 765 x 390	460	2520	N	23
3-Zone Horizontal Compact Tube Furnaces EHC											
EHC 12/450B	1200	55	60	450	600	900	560 x 615 x 390	335	2000	N	20
EHC 12/600B	1200	55	60	600	750	1050	560 x 765 x 390	470	2520	N	25
Single Zone Vertical Compact Tube Furnaces EVA											
EVA 12/150B	1200	-	60	150	300	600	710 x 545 x 545	75	750	N	20
EVA 12/300B	1200	58	60	300	450	750	1040 x 545 x 545	180	1480	N	27
EVA 12/450B	1200	52	60	450	600	900	1040 x 545 x 545	250	2000	N	29
EVA 12/600B	1200	49	60	600	750	1050	1160 x 545 x 545	370	2520	N	33
3-Zone Vertical Compact Tube Furnaces EVC											
EVC 12/450B	1200	58	60	450	600	900	1040 x 545 x 545	338	2000	N	30
EVC 12/600B	1200	58	60	600	750	1050	1160 x 545 x 545	455	2520	N	35

Please note:

- Heat up rate when using an optional ceramic work tube must be limited to 5°C/min
- Heat up time is measured to 100°C below maximum, using an empty work tube and insulation plugs
- Holding power is measured at continuous operating temperature
- Maximum continuous operating temperature is 100°C below maximum temperature
- Dimensions excluding control box (225 x 370 x 390 mm)

www.carbolite-gero.com | Leading Heat Technology

Figura 5.11. Datos técnicos de los hornos disponibles en el catálogo de Carbolite.

El horno tendrá que tener una longitud de calentamiento $\geq 253\text{mm}$. Hay dos posibilidades a escoger, el EHA 12/300B y EHA 12/450B. Debido a que la longitud de 300mm es muy justa, se ha decidido escoger el de 450mm de longitud de calentamiento, es decir, el EHA 12/450B.

En conjunto con el pedido del horno, se añadirá como equipamiento opcional el modulo de ajuste de ángulo que permite variar la configuración del horno de vertical a horizontal y viceversa, además de ajustarlo a un ángulo deseado por el usuario.



Figura 5.12. Configuraciones del horno.

La selección del material del tubo interior del horno dependerá de la temperatura de uso y del flujo de gases. Los materiales ofertados son:

The material, length and diameter of the work tube required for use with each furnace differs. The appropriate material as well as correctly sized work tube for each furnace can be selected from the tables below. Work tube length depends on whether the furnace will be used to work in air or with modified atmosphere/vacuum.

Tube material	Physical & chemical properties			Maximum temperatures [°C]		
	Porous / Impervious	Resistance to thermal shock is partly dependent upon specific tube dimensions	Chemical resistance	in air		under vacuum pressure
				Horizontal	Vertical	Horizontal and Vertical
Sillimanite (Al ₂ SiO ₅)	Porous	Good	Good chemical resistance but porous	1500	1600	-
IAP (Impervious aluminous porcelain)	Impervious	Very good	Good chemical resistance against gases, with the exception of fluorine	1400	1500	1200
Mullite (3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂)	Impervious	Very good	Resistant to flux sulphurous or carbonaceous atmospheres	1500	1550	1350
RCA (Recrystallised alumina)	Impervious	Good	Highly resistant to chemical attack, with the exception of fluorine	1800	1900	1500 (Ø 75 mm) 1450 (Ø > 75 to 88 mm)
Quartz	Impervious	Excellent	Generally good but reactive with sodium & at upper temperature limit with metals, carbonates & halides	1100	1100	1050
APM (Advanced powder metallurgy - FeCrAl)	Impervious	Excellent	Resistant to oxidation, carburization & sulphidation	1300	1350	1200
NiCr alloy (Inconel)	Impervious	Excellent	Good high temperature oxidation resistance combined with good resistance in carburising and chloride containing environments	1100	1100	750
High temperature stainless steel 1.4841 (314)	Impervious	Excellent	Good oxidation resistance	1100	1100	600

Figura 5.13. Listado de materiales disponibles para el tubo interior.

La temperatura máxima del horno durante un periodo alargado es de 1100°C. En casos puntuales, puede alcanzar una temperatura de 1200°C, pero no mantenerla durante mucho tiempo. El material más apropiado para el horno seleccionado es el IAP (Impervious aluminous porcelain). El IAP es impermeable, lo cual interesa para evitar filtraciones y tiene buena resistencia química al paso de gases. Además, la máxima temperatura que soporta esta por encima de la temperatura máxima que puede albergar el horno. El acero inoxidable 314 sería también apropiado debido a sus características. Sin embargo, la temperatura máxima que soporta es inferior a la máxima del horno, por lo que, el IAP es mejor para esta situación.

Para evitar la pérdida de calor por los extremos del horno, se incluye un aislante térmico del tipo C. El trabajo con el horno va a ser en una atmósfera de aire, es decir, no se necesita crear una atmósfera de hidrógeno, ni de gas inerte, ni vacío, por lo que no se precisan aislantes ni sellos especiales en los laterales.



Figura 5.14. Aislante térmico del tipo C.

5.2.2.- Sistema de calentamiento para el monolito cerámico

La segunda etapa del sistema de calentamiento se centrará en el calentamiento del reactor y del monolito hasta la temperatura de 600°C.

Junto con el diseño del generador de gases, se realizó un estudio térmico del reactor y se derivó un posible sistema de calentamiento. Se planteó la idea de insertar el reactor en un horno vertical, que se encontrase a una temperatura de 1100°C, donde el catalizador alcanzaría los 600°C. El sistema a priori se plantea sencillo, en cambio, cabe destacar que en el interior del catalizador se ubica tanto el substrato cerámico como lana de roca, que es un aislante térmico, con una conductividad térmica muy baja, detalle que no se tuvo en cuenta a la hora del diseño. Por lo cual, en el caso de emplear este método, se necesitaría un horno a una temperatura muy elevada y la eficiencia del sistema de calentamiento sería baja. Dada la complejidad del sistema, se ha descartado el uso de este método como sistema de calentamiento del monolito.

Otro de los métodos valorados fue la colocación de resistencias eléctricas alrededor de la carcasa de acero inoxidable que compone el reactor. El problema surge, como en el anterior sistema, a la hora de transferir el calor a través de la lana de roca. Sin embargo, el uso de resistencias eléctricas envolviendo la carcasa del reactor se han implementado como sistema para minimizar las pérdidas de calor del monolito hacía el exterior y mantener la carcasa a una temperatura constante dentro del orden deseado.

Por lo tanto, tras haber sido descartados los 2 sistemas explicados anteriormente por problemas de transmisión de calor a través del material aislante, el método a utilizar debe evitar la interacción con la lana de roca. Para ello se propone el calentamiento del monolito mediante el paso de aire seco caliente por las delgadas paredes del substrato.

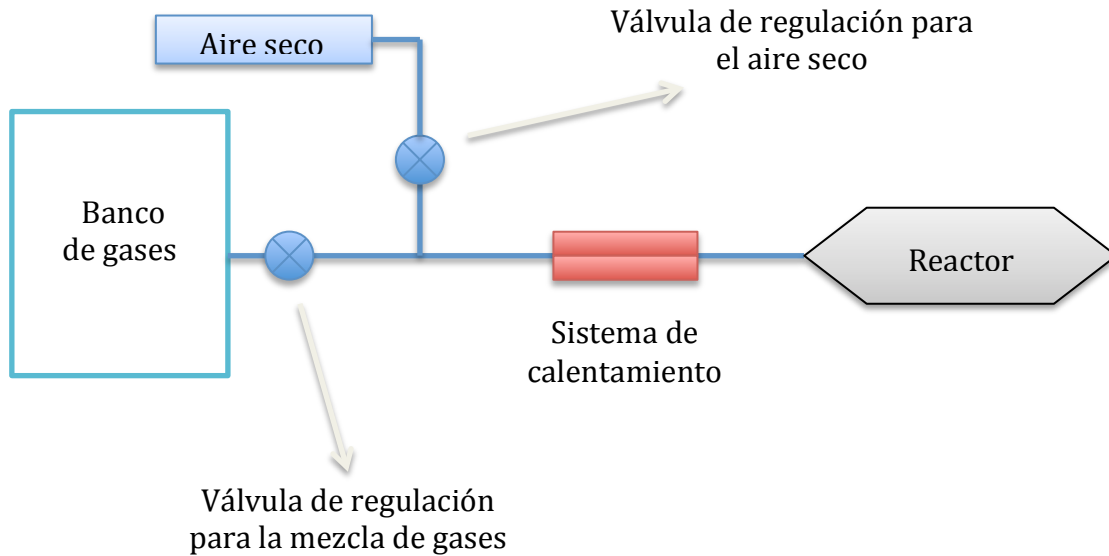


Figura 5.15. Integración del circuito de aire seco al banco de ensayos.

El calentamiento del monolito hasta 600°C mediante el paso de aire caliente supone una ventaja con respecto a los sistemas anteriormente planteados. La transmisión de calor se realizará más rápida y con menos pérdidas de calor. En cambio, el cálculo de la potencia necesaria para el calentamiento del monolito de manera analítica se plantea complicado. El análisis térmico del monolito implica el estudio de la transmisión de calor en cada uno de los conductos que componen la estructura reticular. Dado que el número de conductos oscila entre 1200-1300 canales, el análisis debe realizarse mediante un modelo físico matemático.

Como solución al caso a resolver, el Instituto Universitario CMT Motores Térmicos dispone de un modelo nodal ya validado en trabajos anteriores. Mediante el uso del modelo, se calculará el tiempo que tardará el monolito en alcanzar una temperatura de pared de 600°C .

Para la resolución del problema, se han proporcionado una serie de valores iniciales a insertar en el modelo. El modelo se basó en los siguientes datos:

- Dimensiones del monolito: $\varnothing 40\text{mm} \times L = 50\text{mm}$
- Flujo másico de gas máximo: 150 l/min
- Temperatura máxima del gas: 600°C
- Temperatura mínima de la carcasa: 50°C
- Material de la carcasa: Acero inoxidable
- Material aislante entre monolito y carcasa: Lana de roca
- Material del monolito: Cerámico

El modelo ha proporcionado el tiempo necesario para que el monolito alcance la temperatura deseada con las condiciones iniciales anteriormente expuestas.

Los siguientes gráficos son los resultados del modelo físico matemático.

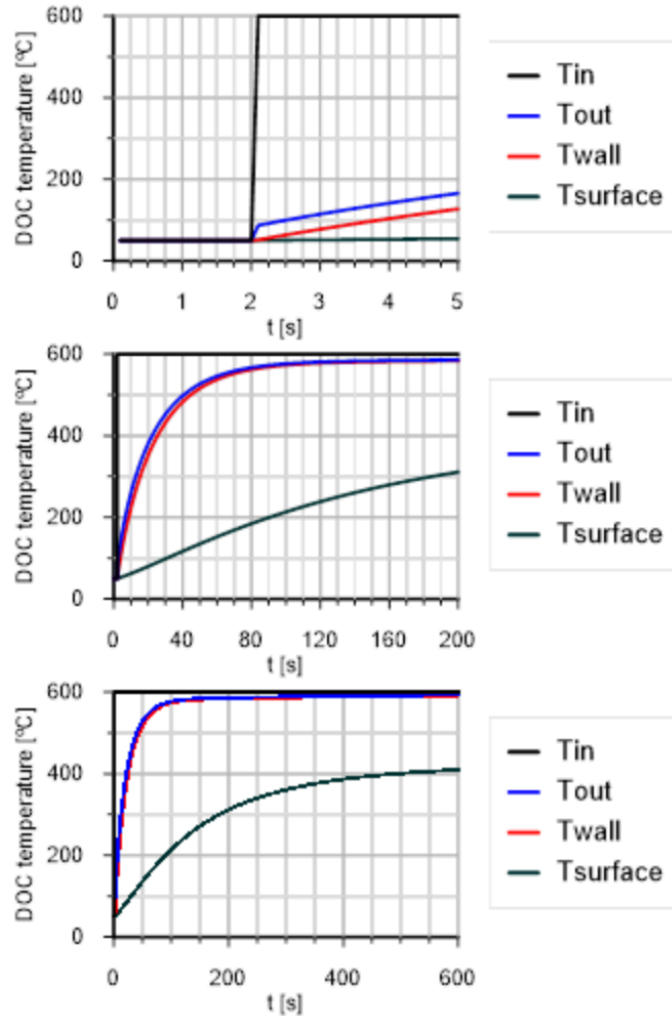


Gráfico 5.1. Gráficas del tiempo de calentamiento del monolito a diferentes escalas temporales.

Los gráficos plasmados muestran la variación de las diferentes temperaturas de control en función del tiempo. Se puede obtener el tiempo necesario para calentar el substrato cerámico hasta 600°C con el paso de aire caliente.

Las temperaturas obtenidas son: la temperatura de entrada del gas T_{in} ; la temperatura de salida del gas T_{out} ; la temperatura de la pared T_{wall} ; y la temperatura de la carcasa del reactor $T_{surface}$.

La temperatura de entrada del gas se mantiene a 600°C durante todo el periodo de tiempo medido.

La temperatura de la pared, T_{wall} , representa la temperatura del monolito en conjunto. Se aprecia como la temperatura del monolito se eleva hasta los 600°C en aproximadamente 120s. La función que la representa empieza a converger y a tomar un valor constante cercano a los 600°C en ese punto. Por lo que, se puede afirmar que se alcanzará la temperatura deseada, tras el paso de flujo caliente a 600°C durante un periodo de 2 minutos.

De la misma manera que evoluciona la temperatura de la pared del monolito, la temperatura de salida del gas va aumentando a medida que la temperatura del monolito se eleva. A medida que aumenta la temperatura de la pared, la temperatura de salida del gas aumenta también, debido a que la transmisión de calor entre el gas caliente y el monolito es menor con el paso del tiempo. Cuando se alcanza la temperatura deseada, el gas sale a la misma temperatura que ha entrado de 600°C.

Finalmente, la temperatura de la carcasa del reactor es la que menor variación sufre. El monolito disipa el calor en la dirección radial, existiendo la interacción con la lana de roca. Debido a ello, la transmisión de calor es pobre y la temperatura de la carcasa se mantiene por debajo de 600°C.

Calentamiento del aire

El aire seco que se utilizará para calentar el monolito no viene por defecto a una temperatura de 600°C. Como se muestra en la figura 5.11, el circuito de aire seco se ha introducido a la instalación, previo paso por el sistema de calentamiento. En el circuito se ha instalado una válvula de regulación de caudal, para poder cerrar y abrir el paso de flujo cuando sea necesario. Cuando se quiera calentar el monolito, la válvula de regulación del banco de gases estará cerrada, mientras que la del aire seco permanecerá abierta. Una vez el monolito ha alcanzado la temperatura deseada, la válvula de regulación cerrará el circuito del aire seco y se abrirá la de la mezcla de gases sintéticos.

El calentamiento del aire seco se realizará de la misma manera que se calienta la mezcla de gases sintéticos. Se hará pasar el flujo de aire seco por el horno horizontal previamente seleccionado, donde se elevará la temperatura del mismo hasta 600°C.

6.- Metodología experimental

6.1.- Objetivos

Los ensayos de validación y calibración a llevar a cabo tienen por objetivo la puesta a punto de los sistemas de medida y de generación de gases, para la validación del banco de ensayo diseñado. Para ello, se llevarán a cabo una serie de ensayos en el laboratorio que evaluarán y corroborarán el estudio analítico previamente realizado.

Los experimentos a realizar se basarán en la validación de los sistemas que componen el banco de ensayo, teniendo mayor importancia la validación del generador de gases. Para garantizar la viabilidad del banco de ensayo, se llevarán a cabo 2 ensayos de calibración y validación, que serán:

1. Calibración de las sondas Horiba MEXA-720NO_x instaladas en el reactor
2. Validación del generador de gases sintéticos

El primer ensayo de calibración se centrará en las sondas MEXA-720NO_x instaladas a la entrada y salida del reactor, que sirven para la obtención de la concentración de NO_x en la mezcla de gases generada. Con el apoyo del MEXA-6000FT calibrado, se procederá al paso de una mezcla que contenga NO_x para comparar los datos de las sondas y los del MEXA-6000FT. En caso de existir diferencias, se comprobará la calibración predeterminada por el fabricante para ajustarlas al banco de ensayo.

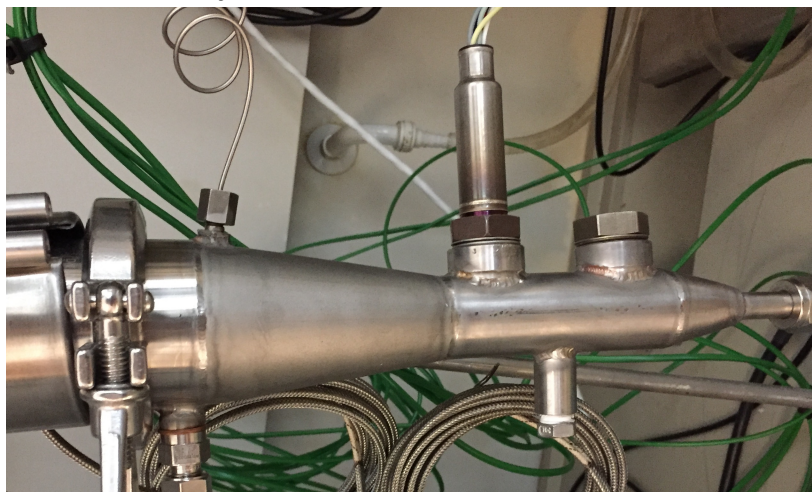


Figura 6.1. Sonda MEXA-720NO_x instalada en el reactor.

Tras haber calibrado los sistemas de análisis de mezcla, se procede a la validación del generador de gases de escape sintéticos. Se generarán mezclas de gases deseada en el ordenador del generador y se compararán los datos de entrada con los datos aportados por el MEXA-6000FT.

En conjunto con los ensayos definidos, se valorará la capacidad del reactor a soportar los flujos de mezcla creados. De manera correlativa, se podrá concluir si la geometría y material seleccionado para reactor diseñado cumple con los requisitos y exigencias del banco.

6.1.- Calibración de la sonda MEXA-720NO_x

Las sondas de óxidos de nitrógeno y oxígeno vienen calibradas con unos parámetros de calibración definidos en fabrica. La descalibración de los sistemas de medición suele ocurrir con frecuencia y es por ello que se realicen calibraciones de manera frecuente. Para asegurar que las sondas a utilizar miden de manera correcta la concentración de los óxidos de nitrógeno, se ha procedido a la calibración de la sonda.

La calibración de la sonda se ha llevado a cabo mediante un proceso de calibración por dos puntos, el *gas cero* y el *gas span*. Previa configuración de la calibración, se enciende la sonda, cuyo tiempo de arranque son 3 minutos.

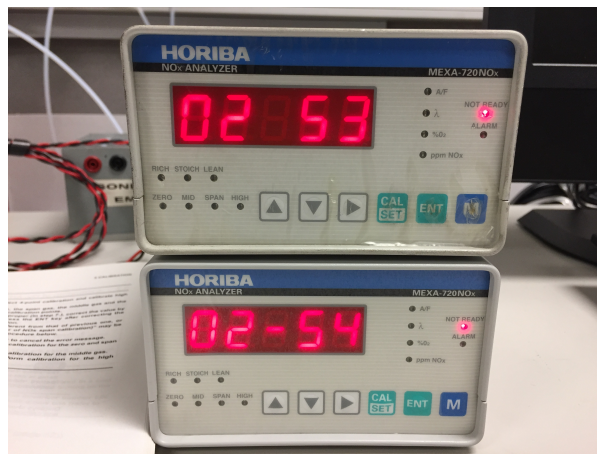


Figura 6.2. Cuenta atrás de arranque de las sondas MEXA-720NO_x.

Una vez la sonda está encendida, se procede a seguir los pasos para ajustar los puntos de calibración. Se han seguido los pasos marcados por el fabricante en el manual adjunto a la sonda.

En primera instancia, se configurarán los puntos de calibración de NO_x.

1. Presionar y aguantar 3 segundos aproximadamente el botón de CAL/SET. En pantalla aparecerá 'ch000' parpadeando.
2. Con los manipuladores se escoge el canal deseado. Pulsar ENT para configurar el canal.
3. Introducir el valor de la concentración de NO_x. Pulsar ENT para confirmar el valor.
4. Pulsar M para volver a la pantalla de medida.

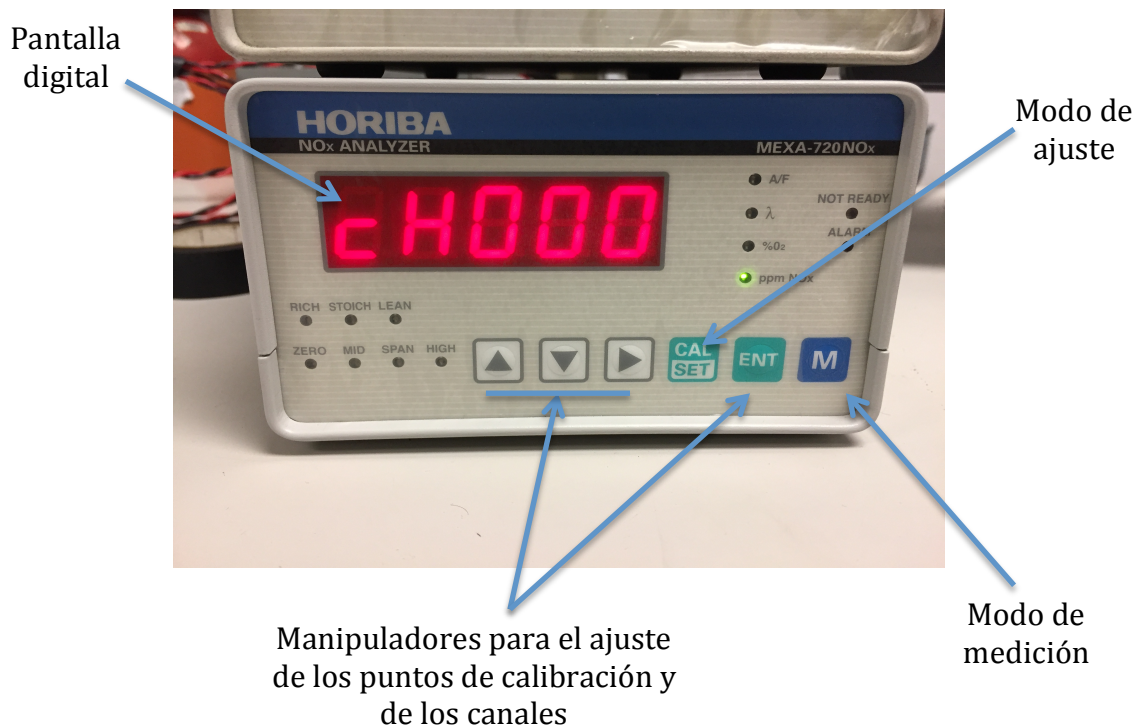


Figura 6.3. Descripción del display de la sonda.

Los canales correspondientes a la calibración de la concentración de NO_x son 'ch000-ch004'. Cada canal se corresponde a:

- ch000: Número de puntos de calibración (2-4 puntos)
- ch001: Concentración del gas cero (0-50ppm)
- ch002: Concentración del gas medio: >NO_{cero} (50-5000ppm)
- ch003: Concentración del gas span: >NO_{medio} (50-5000ppm)
- ch004: Concentración del gas de concentración alta: >NO_{span} (50-5000ppm)

La configuración de los canales ch002 y ch004 solo es necesario en caso de que se realice la calibración por 3 o 4 puntos. En este caso solo se configurarán 3 canales, 'ch000', 'ch001' y 'ch003'. Los valores de los canales serán:

- ch000: 2
- ch001: 0
- ch003: 445

El canal ch001 se corresponde a la concentración de NO_x presente en nitrógeno, es decir, 0 ppm. Este punto sirve para calibrar el punto cero de la sonda, por ello hace pasar nitrógeno para su calibración.

Para la calibración del gas span se utilizará una botella de calibración cuya concentración de NO_x viene ajustada de fábrica a un valor concreto. En este caso, la botella tiene las siguientes características.

Componente	Concentración solicitada	Concentración realizada	Incertidumbre absoluta	Incertidumbre relativa (%)
ppm NO	450,00	442,60	8,852	2,00
ppm NO _x	-	445,00	8,900	2,00
ppm C ₃ H ₈	150,00	148,90	2,978	2,00
%CO ₂	14,00	13,95	0,279	2,00
%CO	0,90	0,93	0,019	2,00
%N ₂	RESTO	RESTO	-	-

Tabla 6.1. Composición química de la botella de calibración utilizada.

La calibración de la sonda se realiza mediante el uso de la unidad de calibración de Horiba.



Figura 6.4. Unidad de calibración de Horiba.

La sonda a calibrar se introduce en la unidad de calibración tal y como se muestra en la figura 6.4. Previo uso de la unidad, se debe añadir agua destilada. El nivel de agua correcto estará comprendido entre Upper y Lower.

A continuación se explicarán los pasos a seguir para la calibración de la sonda. Se calibrará primero el punto cero y después del punto span. Los pasos a seguir son:

1. Encender la sonda.
2. Conectar la sonda a la unidad de calibración.
3. Conectar a la entrada (INLET) de la unidad la tubería saliente de la instalación de gases.

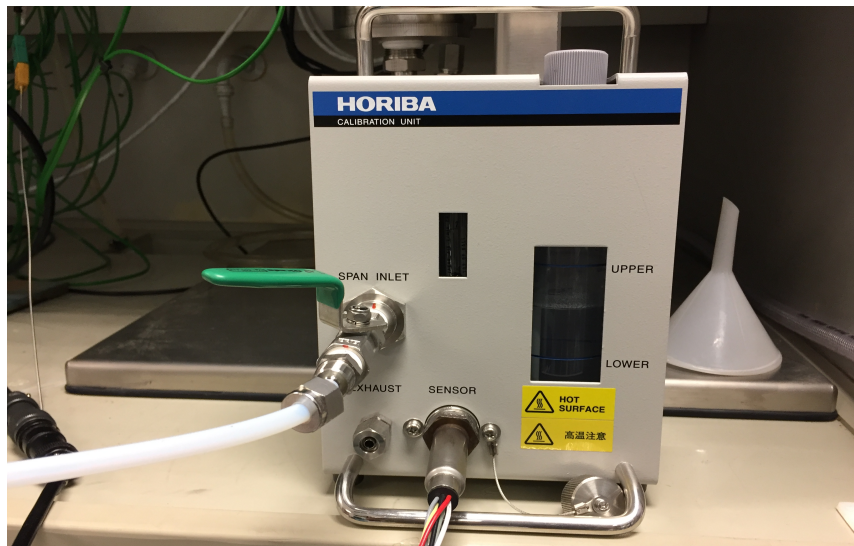


Figura 6.5. Configuración para la calibración de la sonda de NO_x.

4. Asegurar que la sonda está en el modo de medición de NO_x (led ppm NO_x encendido).

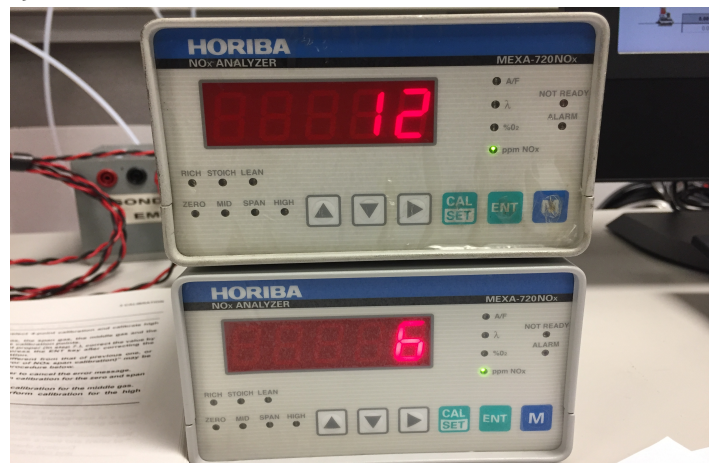


Figura 6.6. Sonda en modo de medición.

5. Configurar el caudal de nitrógeno de 150 l/min en el generador de gases.

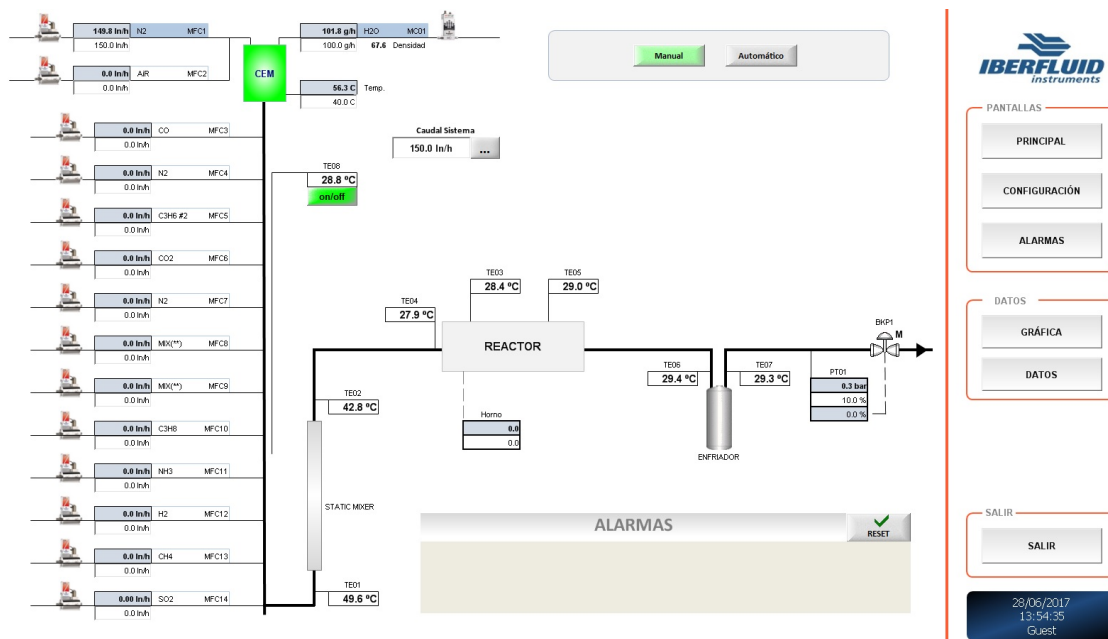


Figura 6.7. Interfaz del programa anexo al generador de gases.

6. Hacer pasar el flujo por la unidad de calibración.
7. Una vez el valor de la concentración se ha estabilizado, presionar CAL/SET 1 vez. Se encenderá el led de ZERO. Comprobar que el valor de ZERO es el deseado (0).
8. Confirmar la calibración del punto cero presionando ENT.

El segundo punto de calibración se realizará con la botella de calibración. Para ello, se harán unas modificación con respecto a la calibración del punto cero. Esta vez, se conectará la botella de calibración mediante una tubería de teflón a la entrada de la unidad de calibración (INLET).

1. Conectar a la entrada (INLET) de la unidad a la botella de calibración.
2. Asegurar que la sonda está en el modo de medición de NO_x (led ppm NO_x encendido).
3. Abrir la botella y el manorreductor hasta una presión de 0,5 bar.
4. Hacer pasar el flujo por la unidad de calibración. Dejar estabilizar.
5. Una vez el valor de la concentración se ha estabilizado, presionar CAL/SET 2 veces. Se encenderá el led de SPAN. Comprobar que el valor de SPAN es el deseado (445).
6. Confirmar la calibración del punto cero presionando ENT.

Tras realizar los pasos indicados, se instalará la sonda de nuevo en el reactor para proceder a la validación de la sonda con el MEXA-6000FT. El MEXA-6000FT ha sido calibrado con la botella de calibración cuyas características se muestran en la figura 6.3. La sonda del MEXA-6000FT se montará en el reactor, donde irá extrayendo y leyendo el flujo pasante de gases con un sistema de medición on-board.

Para realizar la validación, se describirán los pasos a seguir:

1. Montar las sondas MEXA-720NO_x y MEXA-6000FT en el reactor.

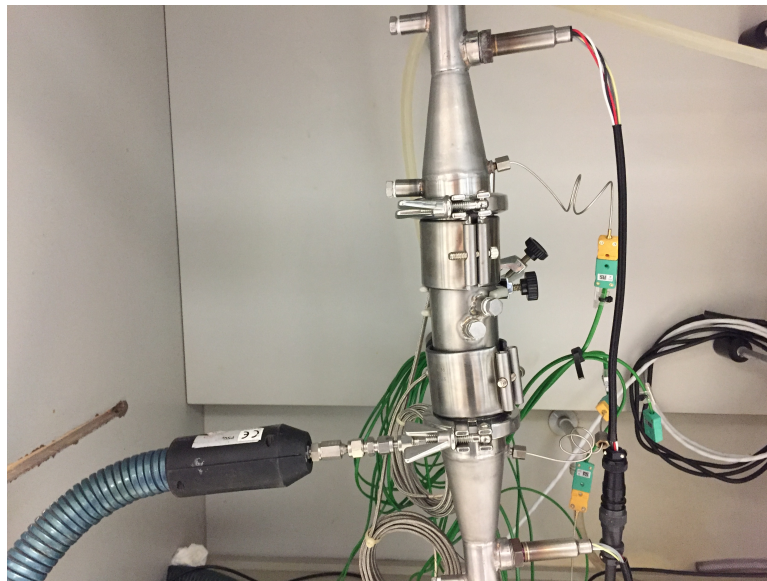


Figura 6.8. Montaje de las sondas en el reactor.

2. Conectar la botella de calibración en el circuito del reactor.
3. Abrir el flujo de gas de la botella a 0,5 bar.
4. Medición de la concentración de NO_x en las sondas MEXA-720NO_x y MEXA-6000FT
5. Comparación de los datos recopilados.

En el ensayo llevado a cabo se han recopilados los datos de ambos sistemas de medición. La comparación de los mismos dará una idea de la calibración y la precisión de ajuste que se le ha otorgado a las sondas. El MEXA-6000FT está calibrado al milímetro, por lo que, dará la concentración de NO_x perfectamente ajustada.

A continuación se mostrarán los valores recopilados:

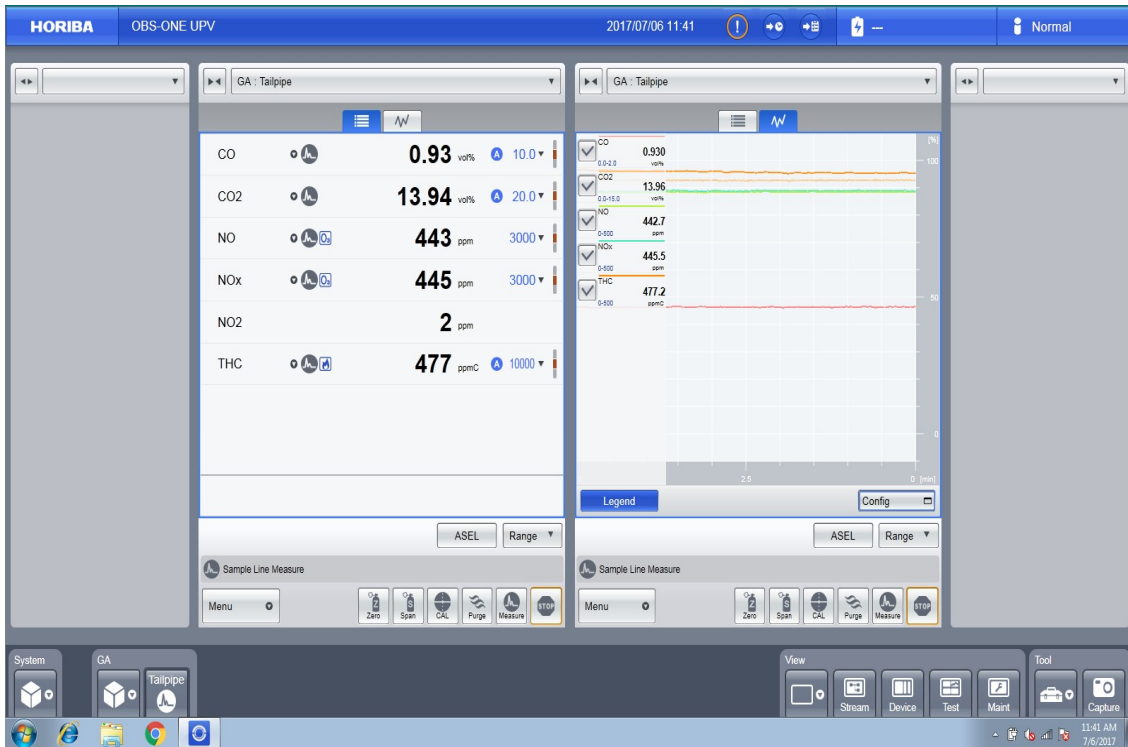


Figura 6.9. Recopilación de datos con el MEXA-6000FT.

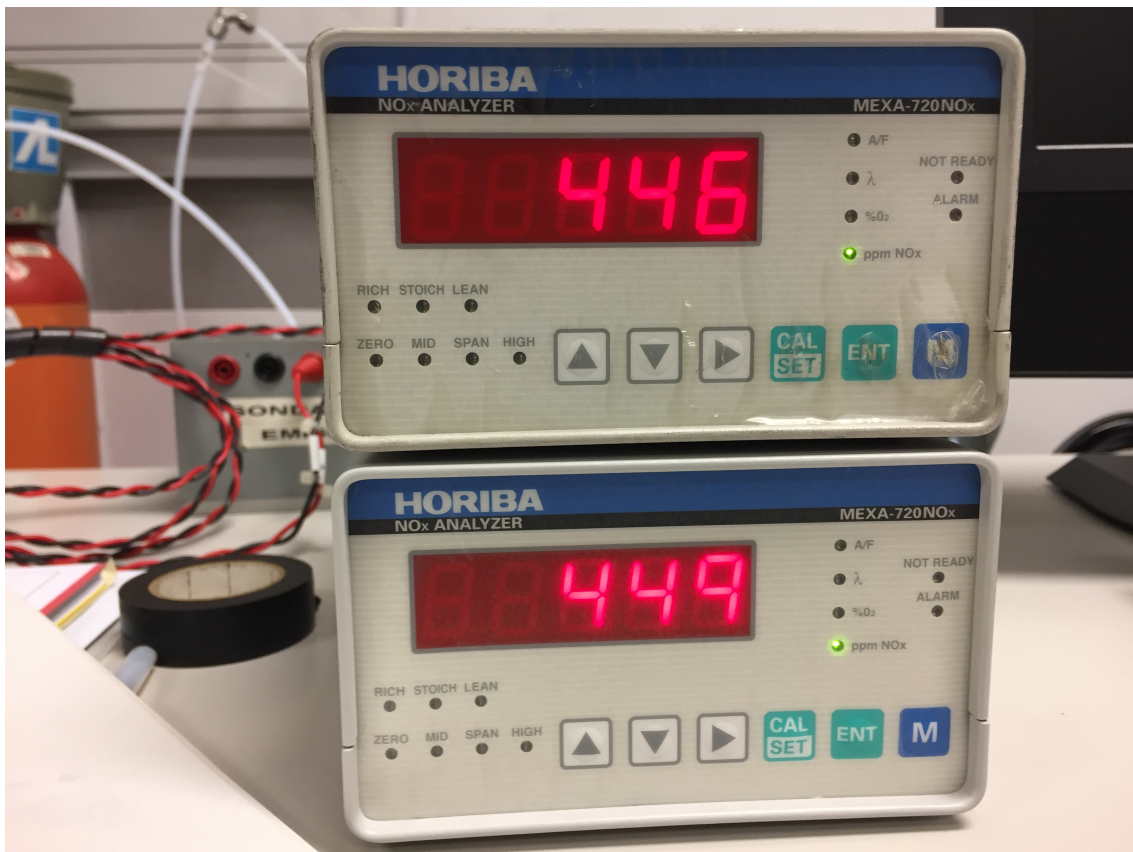


Figura 6.10. Concentración de NOx con la botella de calibración.

La botella de calibración contiene 445 ppm de NO_x en su interior. En la figura 6.8, se puede observar como el MEXA-6000FT muestrea a la perfección la concentración de NO_x presentes, así como del resto de componentes de la botella. Por el contrario, las sondas de NO_x miden 446 ppm la que está instalada a la entrada del reactor y 449 ppm, la situada a la salida del reactor. Esto supone un error de 0,22% para la primera sonda y de 0,9% para la sonda situada a la salida.

Viendo los resultados obtenidos, se puede afirmar que las sondas MEXA-720NO_x han sido calibradas con un error de precisión admisible.

6.2.- Validación del generador de gases sintéticos

Por último, se ensayará para validar el generador de gases sintéticos en el laboratorio que permitirá simular la mezcla de gases deseada. Se probarán mezclas con monóxido de nitrógeno (NO), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄), siendo el nitrógeno el gas transporte para todas las mezclas. Los gases mencionados están presentes en las líneas de escape de tanto motores gasolina como diesel, por lo que, son los más relevantes a la hora de validar el generador. Además, por limitaciones del sistema de análisis de mezcla MEXA-6000FT, solo se pueden evaluar los 4 contaminantes, ya que el resto de ellos no es capaz de medirlos.

El procedimiento a seguir se repetirá para los 4 reactivos anteriormente mencionados. Se procederá a generar una mezcla de nitrógeno con el gas en cuestión y se hará pasar durante 5 minutos por el reactor, donde la sonda del OBS muestreará la mezcla y mostrará los datos en pantalla.

La generación de la mezcla en el generador de gases se realizará mediante la configuración de rampas de validación. Para configurar una rampa se realizarán los siguientes pasos:

En la pantalla principal, pulsar CONFIGURACIÓN.

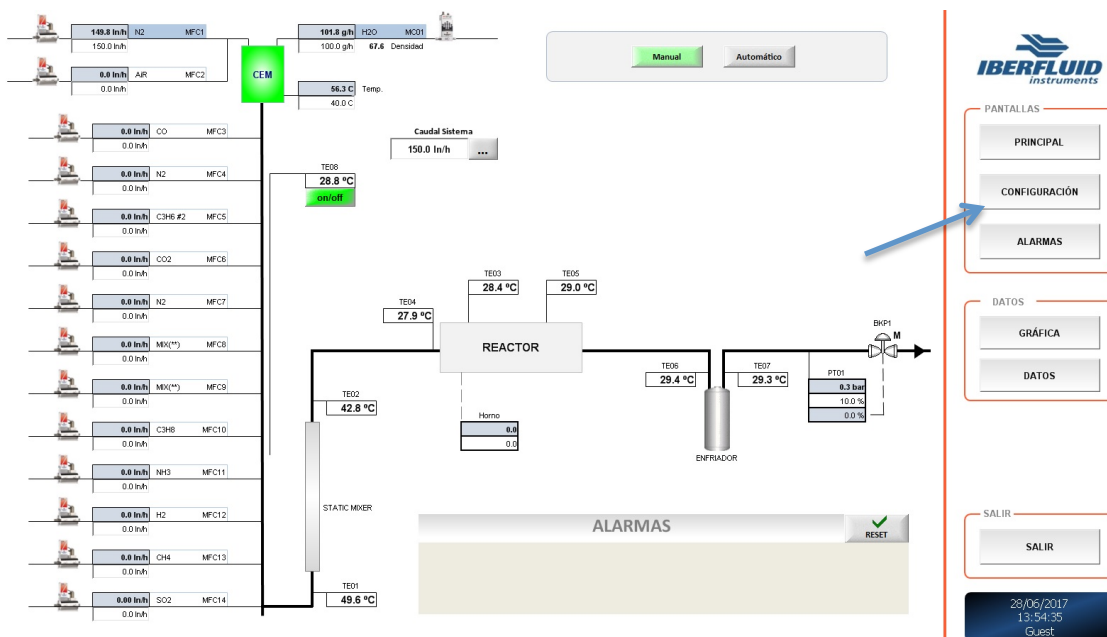


Figura 6.11. Interfaz principal del programa iberCMT.

Hacer clic sobre CONFIGURACIÓN DE RAMPAS.

CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA

Entradas Analógicas	Medida	Valor a 4 mA	Valor a 20 mA	Offset
PT01	0.3 bar	0.0 bar	10.0 bar	0.0 bar
PROBE-1A	0.0 U1	0.0 U1	0.0 U1	0.0 U1
PROBE-2A	0.0 U2	0.0 U2	0.0 U2	0.0 U2
PROBE-3A	0.0 U3	0.0 U3	0.0 U3	0.0 U3
PROBE-4A	0.0 U4	0.0 U4	0.0 U4	0.0 U4
Horno	0.0	0.0	600.0	

Regulación Valvula SP Manual 10.0 SP Regulación 3.0 bar PID

[Configuración de Rampas](#)

[Homing](#)

Comunicaciones serie ACTIVADAS

Frecuencia de grabación del historico (seg.) 1

PANTALLAS

[PRINCIPAL](#)

[CONFIGURACIÓN](#)

[ALARMAS](#)

DATOS

[GRÁFICA](#)

[DATOS](#)

SALIR

[SALIR](#)

28/06/2017 13:58:25 Guest

Figura 6.12. Configuración del sistema.

Configurar la rampa deseada.

CONFIGURACIÓN DE RAMPAS

PASO		In/h														g/h	C
		MFC-1	MFC-2	MFC-3	MFC-4	MFC-5	MFC-6	MFC-7	MFC-8	MFC-9	MFC-10	MFC-11	MFC-12	MFC-13	MFC-14		
1	SP:	0	992.0	800	2500	3000	300	0	0	0	0	0	0	0	1000	10	10
	Tiempo:	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
2	SP:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tiempo:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	SP:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tiempo:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	SP:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tiempo:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	SP:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tiempo:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	SP:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tiempo:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	SP:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tiempo:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	SP:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tiempo:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	SP:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tiempo:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	SP:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tiempo:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nota: SP = ppm Caudal máximo: 1000.0 In/h Caudal para MFC1 y/o MFC2 y PASO: 50.0 In/h

Tiempo = minutos

Nombre:

[Leer](#) [Guardar como...](#) [Borrar](#)

PANTALLAS

[PRINCIPAL](#)

[CONFIGURACIÓN](#)

[ALARMAS](#)

DATOS

[GRÁFICA](#)

[DATOS](#)

SALIR

[SALIR](#)

28/06/2017 13:58:50 Guest

Figura 6.12. Configuración de rampas.

En el paso 1, se introduce solo nitrógeno (MFC-1) a 100 l/h durante 1 minuto para estabilizar las sondas de medida. Además, el CEM se configurará para todas las rampas a una temperatura de 100°C para todo el periodo de ensayo. Cada caudalímetro corresponde a un gas de mezcla, cuya concentración se dará en ppm,

excepto para el nitrógeno cuya entrada se da en l/h. Los caudalímetros a utilizar serán los siguientes:

- MCF-3: Monóxido de carbono
- MCF-6: Dióxido de carbono
- MCF-9: Monóxido de nitrógeno
- MCF-13: Metano

El paso 2 quedará configurado con el paso del gas contaminante a examinar. El caudal de nitrógeno quedará fijado a 500 l/h durante 5 minutos y el CEM a 100°C durante el mismo periodo de tiempo. El gas se añadirá 5 minutos a unas ppm establecidas, cuyo caudal será después regulado automáticamente por el generador, para asegurar las ppm introducidas.

Una vez los pasos están completados, se modificará el caudal máximo de la instalación, cuyo valor será \geq al caudal total. Finalmente, se guarda la rampa con el nombre deseado.

Tras haber configurado la rampa, se vuelve a la pantalla principal, donde se cargará la rampa y se pondrá en marcha el ensayo.

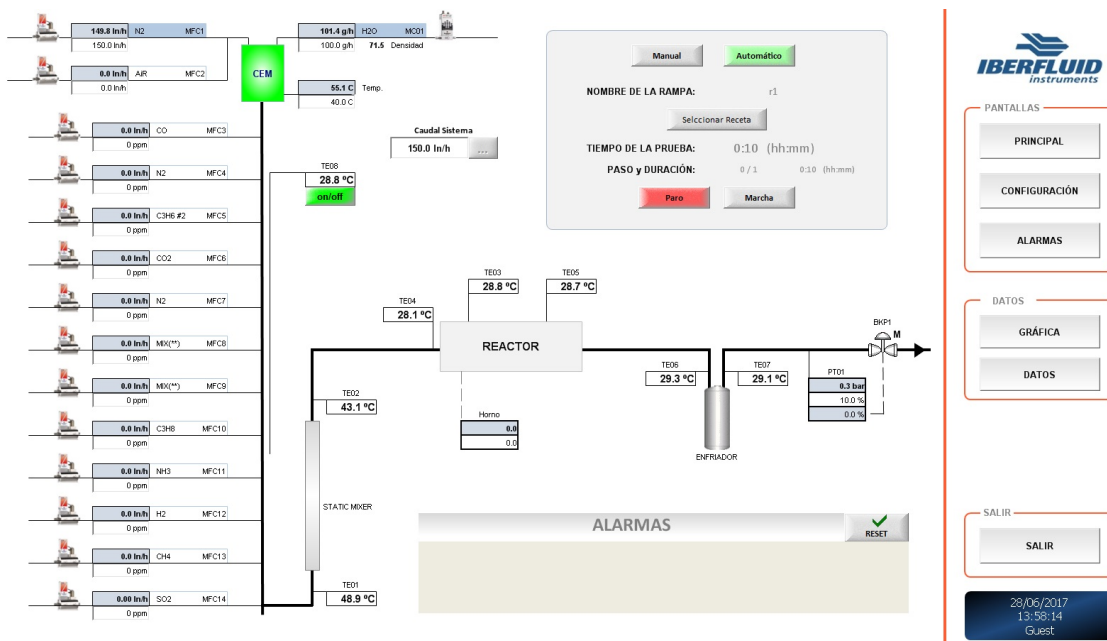


Figura 6.13. Modo automático para la selección de rampas.

Clicando en SELECCIONAR RECETA, se abrirá una ventana donde seleccionar la rampa configurada. Tras el paso de unos segundos, la rampa habrá sido cargada y el sistema estará listo para comenzar a simular la mezcla. Hacer clic sobre MARCHA para comenzar la rampa.

A continuación se mostrarán las rampas configuradas para los ensayos de validación realizados para cada reactivo.

6.2.1.- Ensayo de calibración para CO

Concentración: 4000 ppm

Tiempo: 5 minutos

CONFIGURACIÓN DE RAMPAS

PASO	In/h														g/h	C	
	MFC-1	MFC-2	MFC-3	MFC-4	MFC-5	MFC-6	MFC-7	MFC-8	MFC-9	MFC-10	MFC-11	MFC-12	MFC-13	MFC-14			
1:	SP:	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
	Tiempo:	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2:	SP:	500	0	1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
	Tiempo:	5	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
3:	SP:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tiempo:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4:	SP:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tiempo:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5:	SP:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tiempo:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6:	SP:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tiempo:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7:	SP:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tiempo:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8:	SP:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tiempo:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9:	SP:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tiempo:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10:	SP:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tiempo:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nota: SP = ppm Caudal máximo: 600.0 In/h Caudal para MFC1 y/o MFC2 y PASO: 599.0 In/h
Tiempo - minutos

Nombre:

IBERFLUID
instruments

PANTALLAS

DATOS

SALIR

06/07/2017
13:05:30
Guest

Figura 6.14. Configuración de rampa para el monóxido de carbono.

The screenshot shows the HORIBA OBS-ONE LVPV software interface during a CO test. Key data points include:

- Test Log:** Shows phases 1, 2, and 3 of sampling, with timestamps and status (Start/Finished).
- Test Chart 1:** A graph showing CO concentration (ppm) over time. The concentration starts at 0, rises to a peak of 5.04 ppm, and then stabilizes around 3.55 ppm.
- Exhaust Gas - Tailpipe:**
 - CO: 0.45 vol% (Range: 10.0)
 - CO2: -0.01 vol% (Range: 20.0)
 - NO: 3 ppm (Range: 3000)
 - NOx: 4 ppm (Range: 3000)
 - NO2: 0 ppm
 - THC: 5 ppm (Range: 10000)
- Mass Emission - Tailpipe:**
 - CO: 0.000 g, 0.000 mg/km, 0.000 mg/kWh
 - CO2: 0.000 g, 0.000 mg/km, 0.000 mg/kWh
 - NO: 0.000 g, 0.000 mg/km, 0.000 mg/kWh
 - NOx: 0.000 g, 0.000 mg/km, 0.000 mg/kWh
 - NO2: 0.000 g, 0.000 mg/km, 0.000 mg/kWh
 - THC: 0.000 g, 0.000 mg/km, 0.000 mg/kWh
 - CH4: 0.000 g, 0.000 mg/km, 0.000 mg/kWh
- Trip Composition - Distance:**
 - Urban: 0.10 km/h
 - Rural: 0.00 km/h
 - Motorway: 0.00 km/h
- GPS:** Latitude: N 39° 28'41.558, Longitude: W 0° 20'16.652, Altitude: 36.7 m, Speed: 0.20 km/h.
- Ambient:** Battery Voltage: 24.4 V, Ambient Temp: 32.1 deg C, Ambient Humidity: 47.3 %, Ambient Pressure: 102.1 kPa.
- Exhaust Flow 1:** Sample Line Measure.
- System Metrics:** Duration Time: 00:57:21, Distance: 0.2 km, Work: 0.0 kWh.

Figura 6.15. Recopilación de datos para el ensayo de CO.

6.2.2.- Ensayo de validación para CH₄

Concentración: 2800 ppm
Tiempo: 5 minutos

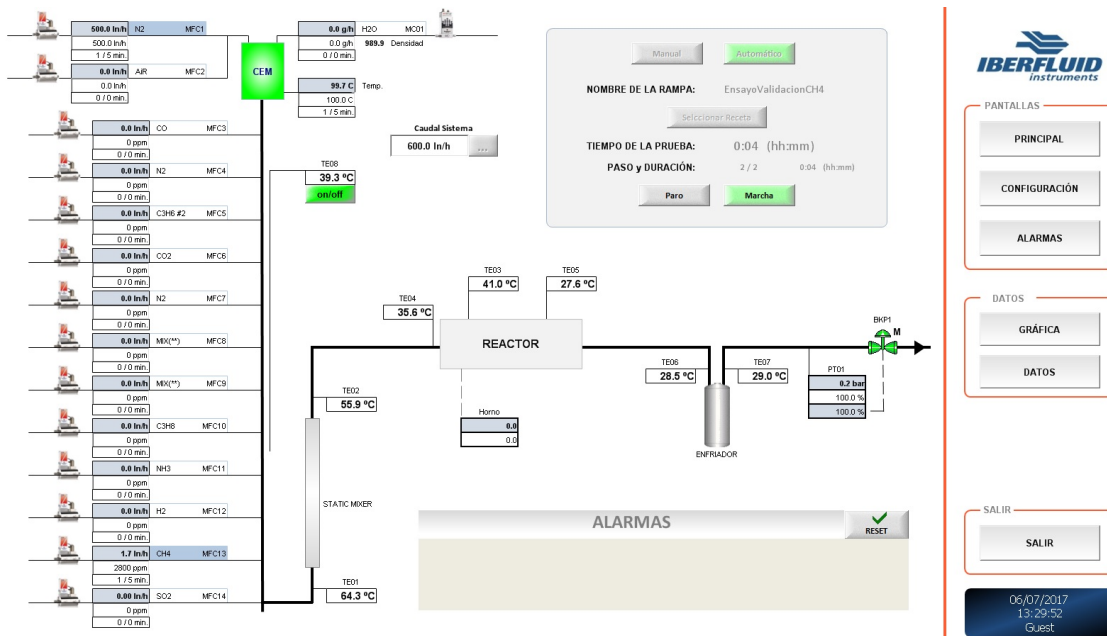


Figura 6.16. Rampa de validación para el metano.

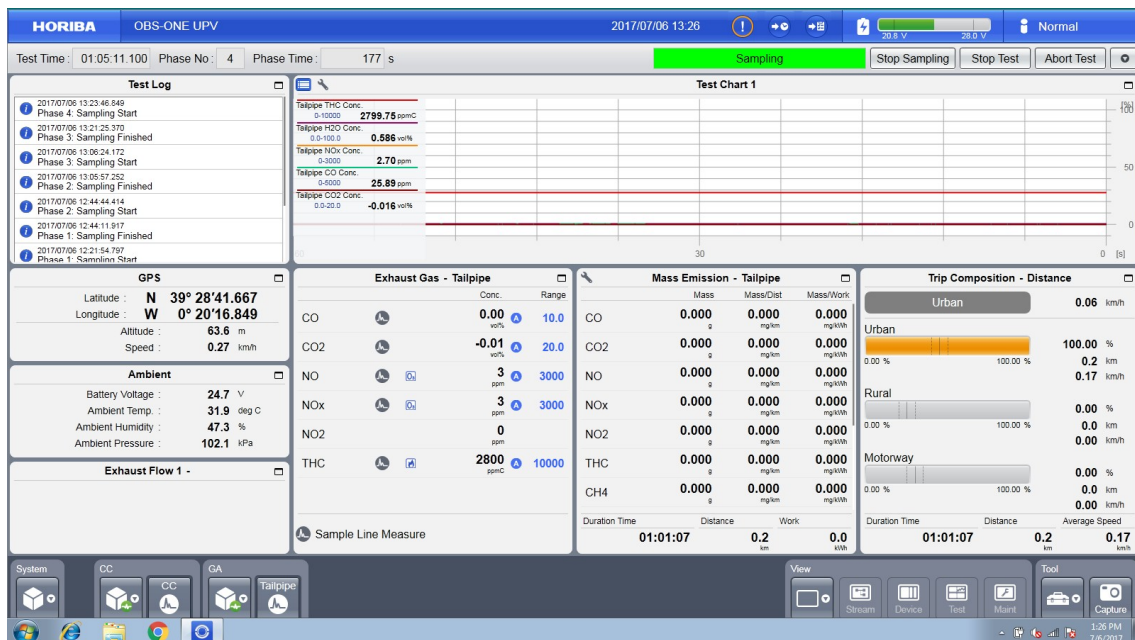


Figura 6.17. Lectura de la concentración de CH₄ presente.

6.2.3.- Ensayo de calibración para CO₂

Concentración: 3500 ppm

Tiempo: 5 minutos

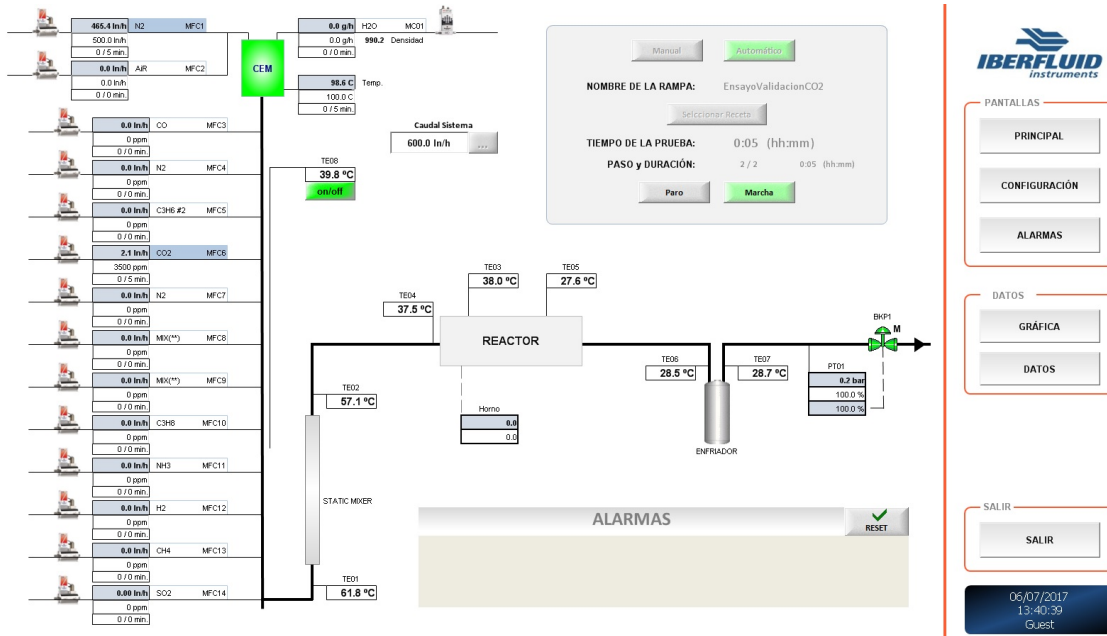


Figura 6.18. Ensayo de validación de dióxido de carbono.



Figura 6.19. Recopilación de datos en el MEXA-6000FT.

6.2.4.- Ensayo de validación para el NO

Concentración: 1850 ppm

Tiempo: 5 minutos

CONFIGURACIÓN DE RAMPAS

PASO	In/h														g/h	C	
	MFC-1	MFC-2	MFC-3	MFC-4	MFC-5	MFC-6	MFC-7	MFC-8	MFC-9	MFC-10	MFC-11	MFC-12	MFC-13	MFC-14			
1:	SP:	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
	Tiempo:	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2:	SP:	500	0	0	0	0	0	0	0	1850	0	0	0	0	0	0	100
	Tiempo:	5	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	5
3:	SP:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tiempo:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4:	SP:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tiempo:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5:	SP:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tiempo:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6:	SP:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tiempo:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7:	SP:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tiempo:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8:	SP:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tiempo:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9:	SP:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tiempo:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10:	SP:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tiempo:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nota: SP = ppm Caudal máximo: 600.0 In/h Caudal para MFC1 y/o MFC2 y PASO: 598.0 In/h

Tiempo - minutos

Nombre:

PANTALLAS

PRINCIPAL

CONFIGURACIÓN

ALARMAS

DATOS

GRÁFICA

DATOS

SALIR

SALIR

06/07/2017
13:53:18
Guest

Figura 6.20. Configuración de la rampa de validación para el NO.

Figura 6.21. Lectura del MEXA-6000FT de la concentración de NO presente en la mezcla generada.

Los resultados obtenidos en los múltiples ensayos de validación llevados a cabo se pueden catalogar como aceptables. Las desviaciones apreciadas entre las mediciones con el MEXA-6000FT y lo establecido en el iberCMT para la generación de mezclas están dentro del rango de error permitido. A consecuencia de esto, se puede afirmar que el generador de mezcla es capaz de simular mezclas de gases con la suficiente precisión. Los ensayos han permitido validar el generador de gases, el cual se utilizará en un futuro para la validación del reactor diseñado y realizar estudios de post-tratamiento en el laboratorio.

7.- Conclusión

El objetivo principal del proyecto presente es el diseño de reactor catalítico para caracterización sistemas de post-tratamiento para gases de escape de motores de combustión interna en banco de gases sintéticos. Se ha logrado dimensionar y diseñar un reactor versátil, con un sistema modular, que le aporta una gran capacidad de adaptación a múltiples configuraciones de ensayo. Consigo mismo, se ha logrado introducir la instrumentación de medición debida, tanto a la entrada y salida como entre cada sistema de post-tratamiento. Con ello se ha adquirido un control total sobre la mezcla y con ello, la posibilidad de realizar estudios de post-tratamiento con un flujo controlado y ver el impacto de los sistemas de post-tratamiento, tanto de manera individual como global, sobre la mezcla.

En conjunto con el diseño del reactor, se ha seleccionado un sistema de calentamiento de gases que permite elevar la temperatura de la mezcla de gases y del monolito hasta ordenes por encima de los 600°C. Con la selección de un solo sistema de calentamiento para el calentamiento de la mezcla y del monolito se han optimizado en espacio y en inversión económica. El sistema de calentamiento abre el abanico de posibilidades para la configuración de ensayos.

Finalmente, los ensayos de validación del generador de gases han corroborado el funcionamiento correcto de la instalación y su validez para realizar ensayos en el futuro. Además, se ha logrado calibrar, con un error depreciable, las sondas de óxidos de nitrógeno que quedarán instaladas en el reactor diseñado.

8.- Presupuesto

El objetivo de este apartado es calcular el coste total de la realización del proyecto llevado a cabo. El estudio económico constará de tres partes:

1. Honorarios profesionales
2. Coste de amortización de los equipos utilizados
3. Coste de materiales, instrumentación y procesos de fabricación

Los costes de los materiales e instrumentación están estipulados por los fabricantes y cumplen con los requisitos legales. Los costes de fabricación han sido estimados en consenso con el personal del departamento. Tras la suma de los presupuestos parcial en bruto, se aplicará el 21% de I.V.A correspondiente al pago de impuestos.

8.1.- Honorarios profesionales

Para realizar el cálculo de la inversión a realizar en mano de obra, se tendrá en cuenta el tiempo dedicado en el desarrollo del proyecto por un ingeniero recién graduado. Estimando el coste anual que supone la contratación de un ingeniero, se calculará el coste unitario por hora. El precio de hora multiplicado por las horas invertidas, dará el coste final de mano de obra.

El tiempo invertido en el diseño y desarrollo del proyecto se puede calcular sabiendo la cantidad de horas media de implicación diaria por parte del ingeniero. Sabiendo el número de semanas anuales y de vacaciones (festivos incluidos), se calcula el número de horas de trabajo.

$$40 \frac{\text{horas trabajadas}}{\text{semana}} * 52 \frac{\text{semanas}}{\text{año}} = 2.080 \frac{\text{horas de trabajo}}{\text{año}}$$

$$\left(2.080 \frac{\text{horas de trabajo}}{\text{año}} - \left(4 \frac{\text{semanas}}{\text{año}} * 5 \frac{\text{días}}{\text{semana}} * 8 \frac{\text{horas}}{\text{día}} \right) - \left(14 \frac{\text{días festivos}}{\text{año}} * 8 \frac{\text{horas}}{\text{día}} \right) \right) = 1808 \frac{\text{horas}}{\text{año}}$$

En cuanto al cálculo los costes de mano de obra del ingeniero encargado de desarrollar el proyecto, cabe destacar que se trata de un ingeniero recién graduado, sin experiencia previa en el mercado laboral. Como referencia se han tomado las ofertas del Instituto Universitario CMT Motores Térmicos para tomar el sueldo medio ofertado para un ingeniero sin experiencia. Los sueldos ofrecidos oscilan entre los 19.000€ y 23.000€ brutos al año, lo cual tomando una media entre los dos valores, se obtiene un sueldo de 21.000€ brutos anuales.

Por lo cual, el precio unitario por hora será de:

$$\frac{21.000 \frac{\text{€ brutos}}{\text{año}}}{1808 \frac{\text{horas}}{\text{año}}} = 11,61 \frac{\text{€}}{\text{hora}}$$

Conociendo la cantidad de horas invertidas a diario, se obtiene el coste de la mano de obra:

$$11,61 \frac{\text{€}}{\text{hora}} * 6 \text{ meses} * 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} * 1 \frac{\text{hora}}{\text{dia}} = 2.089,80\text{€}$$

8.2.- Coste de amortización de los equipos utilizados

El uso y desgaste de los sistemas electrónicos y materiales ya existentes en el departamento y empleados en el desarrollo del proyecto se tendrán en cuenta en forma de amortización del utilitario. Se tendrá en cuenta el uso de los siguientes equipos:

1. Banco generador de gases sintéticos
2. Sistema de análisis de mezcla Horiba MEXA-6000FT
3. Ordenador personal

El coste de amortización que ha supuesto el uso de los aparatos anteriormente mencionados, se calculará a través de la siguiente fórmula:

$$A = P * \frac{t}{T}$$

Donde P es el coste del equipo (€); T la vida útil del sistema (años); y t el tiempo de manipulación requerida (años).

Utilitario	Coste (€)	Amortización (años)	Tiempo de uso (meses)	Tiempo de uso diario (horas)
Horiba MEXA-6000FT	150.000	10	1	4
Banco generador de gases	72.000	10	1	4
Ordenador personal	700	4	4	6

Tabla 7.1. Utilitario de amortización.

Por lo tanto, el coste de amortización de cada sistema utilizado será de:

$$A(\text{Horiba}) = 150.000 * \frac{1 \text{ mes} * 20 \frac{\text{días}}{\text{mes}} * 4 \frac{\text{horas}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ año}}{8760 \text{ horas}}}{10 \text{ años}} = 136,99€$$

$$A(\text{Generador}) = 72.000 * \frac{1 \text{ mes} * 20 \frac{\text{días}}{\text{mes}} * 4 \frac{\text{horas}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ año}}{8760 \text{ horas}}}{10 \text{ años}} = 63,75€$$

$$A(\text{Ordenador}) = 700 * \frac{4 \text{ meses} * 20 \frac{\text{días}}{\text{mes}} * 6 \frac{\text{horas}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ año}}{8760 \text{ horas}}}{4 \text{ años}} = 9,59€$$

El coste total de las amortizaciones del utilitario sin impuestos será:

$$A(\text{total}) = 136,99 + 63,75 + 9,59 = 210,33€$$

8.3.- Coste de materiales, instrumentación y procesos de fabricación

El coste de los materiales seleccionados para la fabricación del reactor se muestran en la siguiente tabla:

Material	Unidades	Coste por unidad (€/unidad)	Coste por metro (€/m)	Coste total (€)
Reducción 28/12	2	15	-	30
Reducción 51/25	2	18	-	36
Abrazaderas clamp	2	38	-	76
Casquillos M14x1.5	4	10	-	40
Casquillos 1/8 npt	6	8	-	42
Tubo acero inoxidable 316L Ø25	1	-	60	60
Tubo acero inoxidable 316L Ø50	1	-	87	87
Tubería de teflón Ø6mm	2	-	5	10
Gases técnicos	1	100	-	100
TOTAL				481

Tabla 7.2. Coste de materiales empleados.

Además, se tiene que calcular el coste de la instrumentación requerida y no disponible previamente en el laboratorio. Se muestra en la siguiente tabla:

Instrumentación	Unidades	Coste unitario (€/unidad)	Coste total (€)
Termopar	2	40	80
Sondas NO _x y O ₂	2	12000	24000
Sensores de presión	2	700	1400
Sondas de muestreo	4	40	160
TOTAL			25640

Tabla 7.3. Coste de instrumentación.

El sistema de control de la temperatura de los gases y del reactor requerirá una inversión inicial, así como también las resistencias eléctricas utilizadas.

Componente	Numero de serie	Fabricante	Unidades	Coste unitario (€/unidad)	Coste (€)
Resistencias eléctricas	MB2E2AX7	WATLOW	2	129	258
Horno	EHA 12/450B	CARBOLITE	1	4500	4360
TOTAL					4618

Por último, se tiene en cuenta el coste de mano de obra del operario encargado de fabricar el reactor y acoplar las sondas de muestreo. El proceso de fabricación ha sido llevado a cabo por un operario de laboratorio con experiencia y antigüedad, con un sueldo bruto anual de 24.000€. Como se ha realizado anteriormente, se calcula el precio por hora:

$$\text{Coste operario} \left(\frac{\text{€}}{\text{h}} \right) = \frac{24000 \frac{\text{€}}{\text{año}}}{1808 \frac{\text{horas}}{\text{año}}} = 13,27 \frac{\text{€}}{\text{h}}$$

Para todo el proceso de fabricación se ha requerido un tiempo de 16 horas (2 días de trabajo). Por lo tanto, el coste de mano de obra por parte del operario será de:

$$\text{Coste mano de obra} = 13,27 \frac{\text{€}}{\text{h}} * 16\text{h} = 212,39\text{€}$$

El total coste de materiales, instrumentación y mano de obra del operario será de:

$$\text{Coste total} = 30.951,39 \text{ €}$$

8.4.- Presupuesto final

La suma total del coste de los tres presupuestos parciales será:

$$\begin{aligned} \textit{Presupuesto en bruto} &= 2.089,80 + 210,33 + 30.951,39 = \\ &= 33.251,52 \text{ €} \end{aligned}$$

E incluyendo el 21% de I.V.A:

$$33.251,52 * 0,21 = 6.982,82 \text{ €}$$

$$33.251,52 + 6.982,82 =$$

$$\underline{\underline{\mathbf{40.234,34 \text{ €}}}}$$

9.- Bibliografía

BROATCH JACOBI, A., GALINDO LUCAS, J. y PAYRI MARÍN, R. (2008). *Problemas de ingeniería térmica*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

BRONKHORST FLUIDAT. *Cálculo de propiedades térmicas y físicas de fluidos*.
<https://www.fluidat.com/default.asp>

BRONKHORST HIGH-TECH B.V. *Catálogo de Bronkhorst Online*.
<http://www.bronkhorst.com/en/products/>

CARBOLITE-GERO. *Catálogo de Carbolite-Gero Online*.
<http://www.carbolite-gero.com/products/tube-furnace-range/>

HECK R., FARRAUTO R. Y GULATI, S.(2009). *Catalytic Air Pollution Control: Commercial Technology. Third Edition*. Wiley.

IBERFLUID INSTRUMENTS. *Manual del generador de gases*.

MORALES LÓPEZ, A. (2014). *Diseño de banco de ensayo para sistemas de post-tratamiento de gases de escape de motores de combustión interna alternativos*. Trabajo de fin de grado. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

PAYRI GONZÁLEZ, F. y DESANTES FERNÁNDEZ, J.M (2011). *Motores de combustión interna alternativos*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

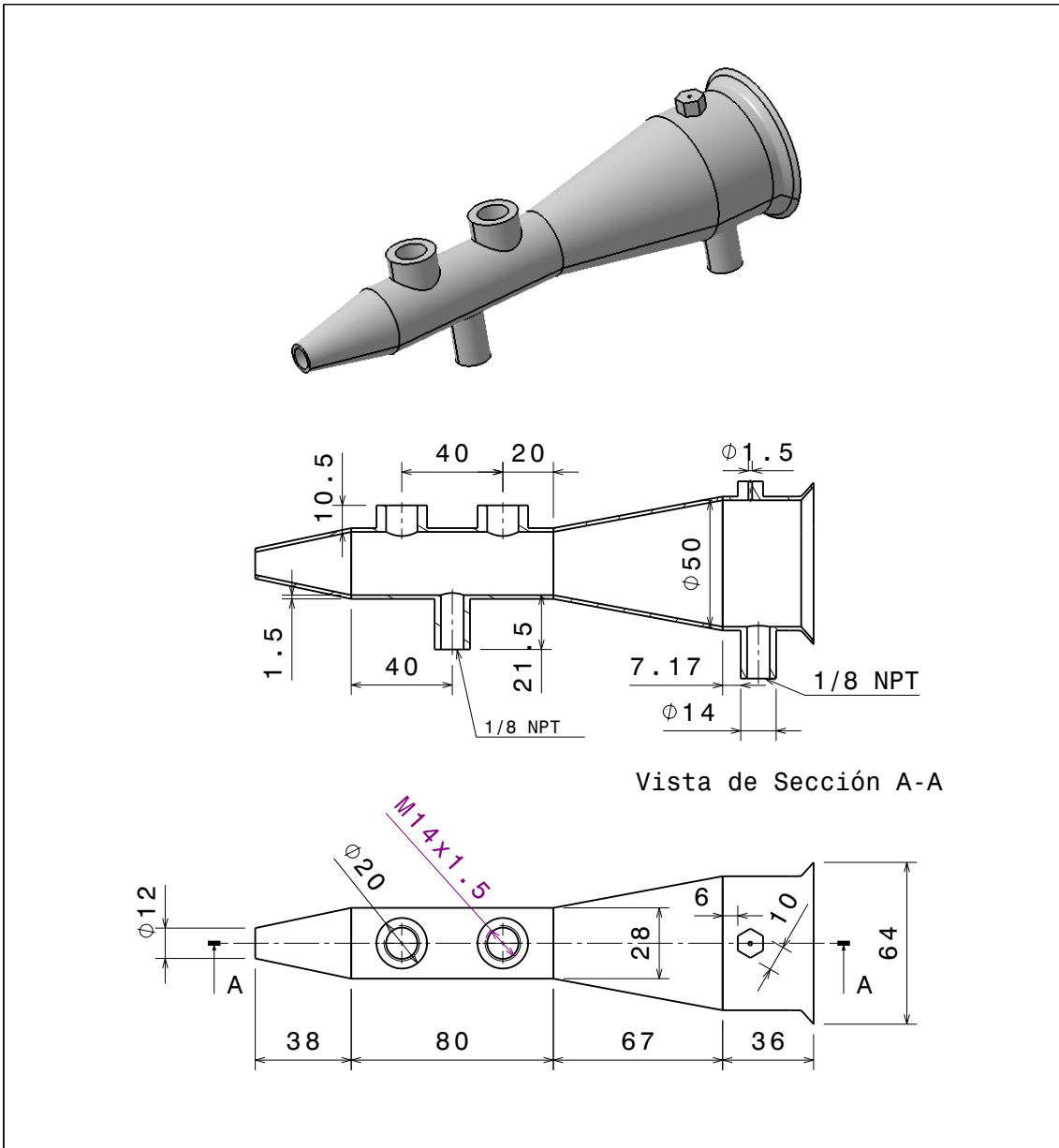
PIQUERAS CABRERA, P. (2010). *Contribución al modelado termofluidodinámico de filtros de partículas diesel de flujo de pared*. Tesis doctoral. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.



QUILINOX. *Catálogo de Quilinox Online*.
<http://www.quilinox.com/catalogo/tubos-mangueras/>

TORREGROSA HUGUET, A., GALINDO LUCAS, J. Y CLIMENT PUCHADES, H. (2001). *Ingeniería térmica. Fundamentos de Termodinámica*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

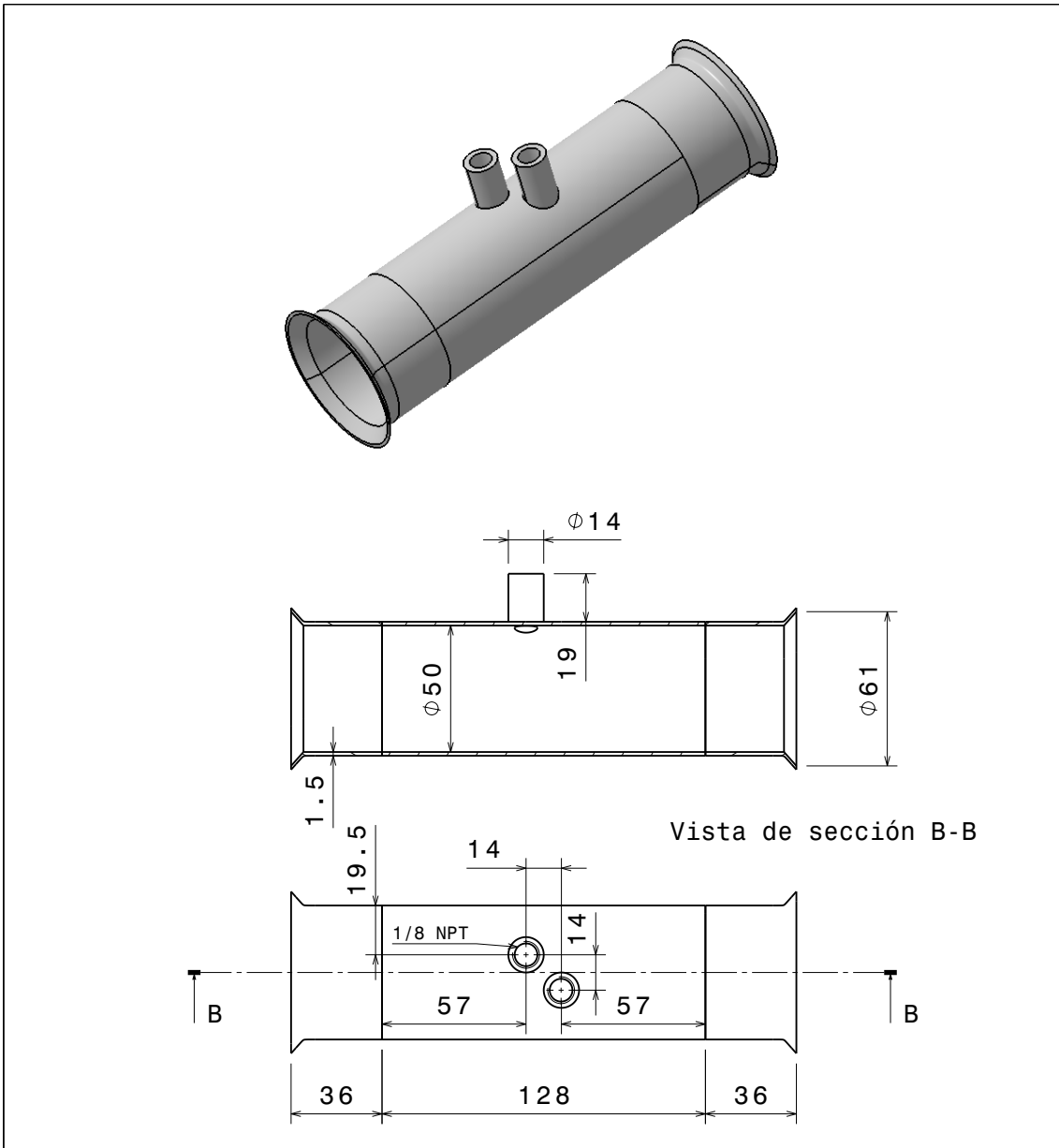
PLANOS



Módulo de entrada y de salida del reactor



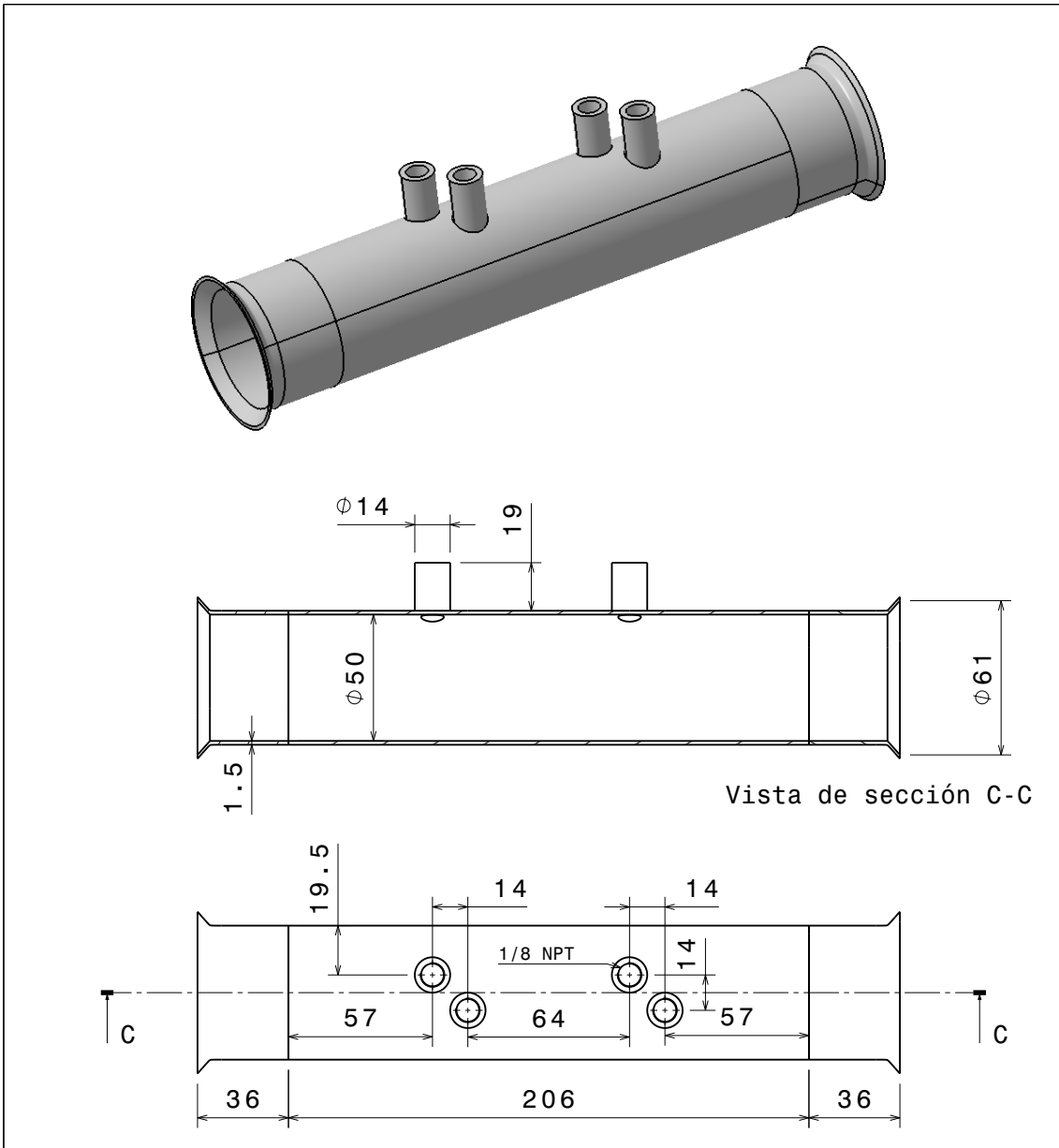
Designer: Sergio Cáceres Caveró	Scale: 1:2
Department: DMMT	  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
Description: Módulo de entrada y de salida del reactor	



Alojamiento central para 2 monolitos



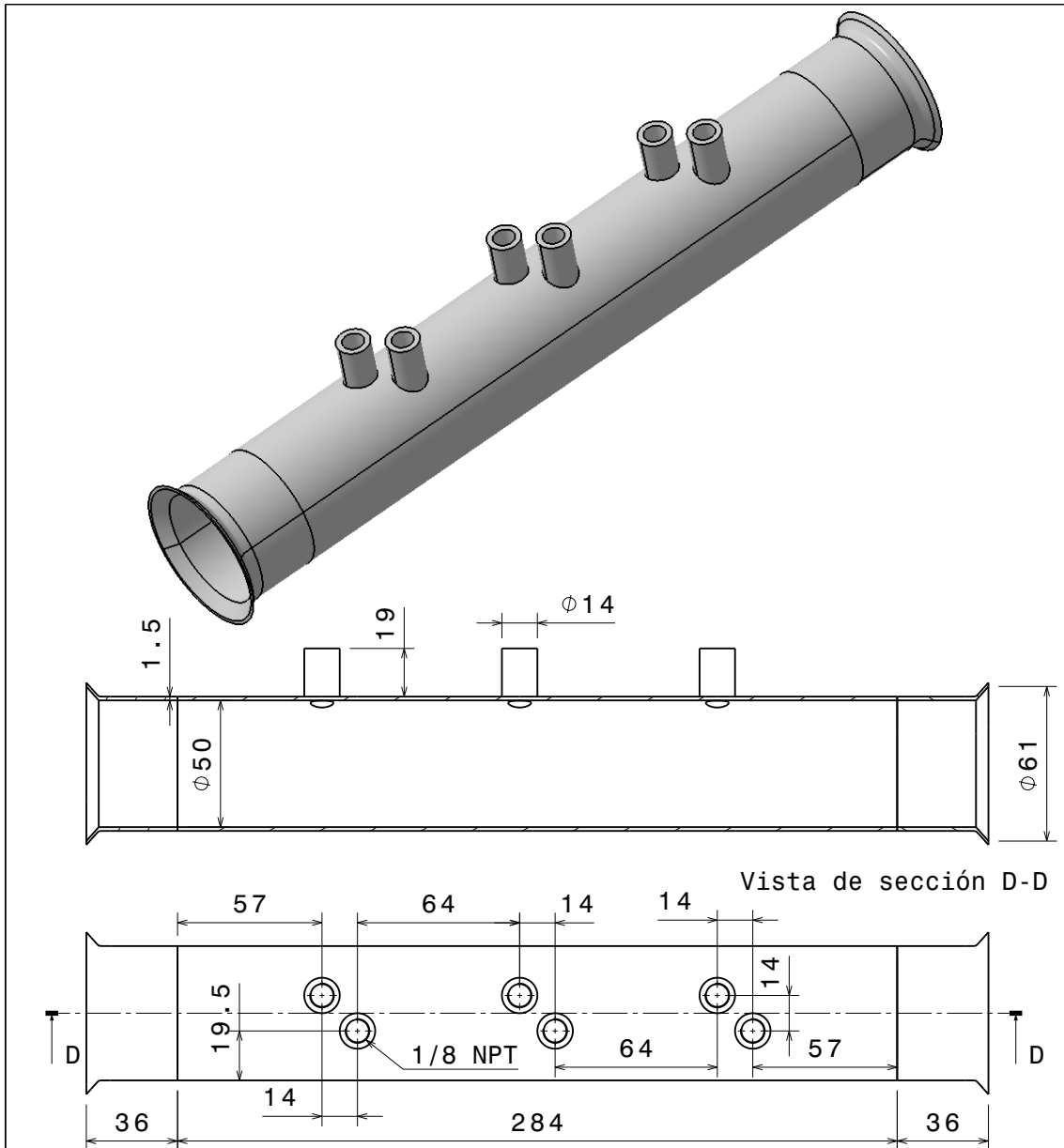
Designer:	Sergio Cáceres Cavero	Scale:	1:2
Department:	DMMT	 	
Description:	Alojamiento central para 2 monolitos		



Alojamiento central para 3 monolitos



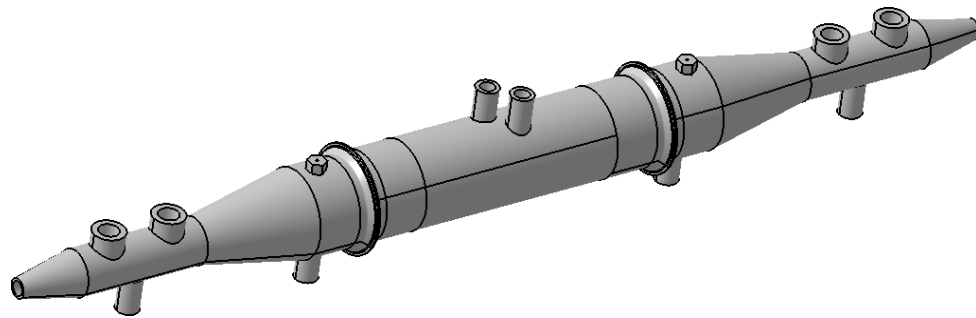
Designer:	Sergio Cáceres Cavero	Scale:	1:2
Department:	DMMT	 	
Description:	Alojamiento central para 3 monolitos		

Alojamiento central para 4 monolitos





Designer:	Sergio Cáceres Cavero	Scale:	1:2
Department:	DMMT	  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	
Description:	Alojamiento central para 4 monolitos		

Reactor



Vista Isométrica

Designer: Sergio Cáceres Caverro	Scale: 1:3
Department: DMMT	  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
Description: Reactor	

PLIEGO DE CONDICIONES

11.1.- Introducción

El presente Pliego de Condiciones Técnicas, tiene por objeto dejar definido el manual de condiciones técnicas para el proceso de fabricación del reactor. Se resumirán los procesos a seguir por el operario para la certera fabricación del prototipo diseñado, así como los métodos de procesado necesarios.

La descripción de los pasos a seguir para la fabricación completa del reactor se dividirá en dos:

1. Módulos de entrada y salida del reactor
2. Alojamiento central

Previa descripción del manual, se explicará brevemente el método de soldadura utilizado para la conexión entre las reducciones y los tubos de acero inoxidable.

Cabe destacar que para la fabricación del reactor se han utilizado piezas estandarizadas, cuyas dimensiones vienen predefinidas por el fabricante. Se ha logrado darle mayor flexibilidad y sencillez al montaje del prototipo.

Se llevará a cabo la fabricación del reactor con alojamiento central para 2 monolitos. Los materiales necesarios serán:

Material	Unidades
Tubo $\varnothing 25mm$	1
Tubo $\varnothing 50mm$	1
Reducción 25/12	2
Reducción 51/25	2
Clamp NW50	2
Casquillo M14X1,5	4
Casquillo $\frac{1}{8} npt$	6
Termopar	2

Tabla 11.1. Materiales necesarios para la fabricación del reactor.

En función del alojamiento central que se vaya a fabricar, el número de casquillos de $\frac{1}{8} npt$ variará en ± 2 unidades. Las abrazaderas clamp NW50 son un conjunto de piezas donde se encuentra por cada unidad, dos conexiones NW50, una abrazadera y una junta PTFE de conexión para evitar fugas.

Los módulos que conforman el reactor estarán fabricados de elementos soldados entre sí mediante el uso de la soldadura TIG.

11.2.- Soldadura TIG

La técnica de soldadura TIG, *Tungsten Inert Gas*, es una tarea de soldadura manual por arco eléctrico, con el uso de un electrodo de Tungsteno, con alta resistencia a temperaturas altas (punto de fusión 3410°C), lo que conlleva un desgaste mínimo del electrodo. Se realiza en una atmosfera protectora de gas inerte, que protege el arco eléctrico. Los gases más utilizados son Helio (He) y Argón (Ag).

La soldadura TIG es la más utilizada para aceros inoxidable de espesor reducido. Las temperaturas de trabajo no son lo suficientemente altas como para que el acero inoxidable sufra deformaciones. Mediante el uso de esta técnica, se obtienen cordones más resistentes, más dúctiles y menos sensibles a corrosión que con otras técnicas de soldadura de metales.

Para la soldadura de las piezas que componen el reactor se utilizará Argón como gas inerte de protección.

En la siguiente figura se muestra la disposición de los elementos para el proceso de la soldadura.

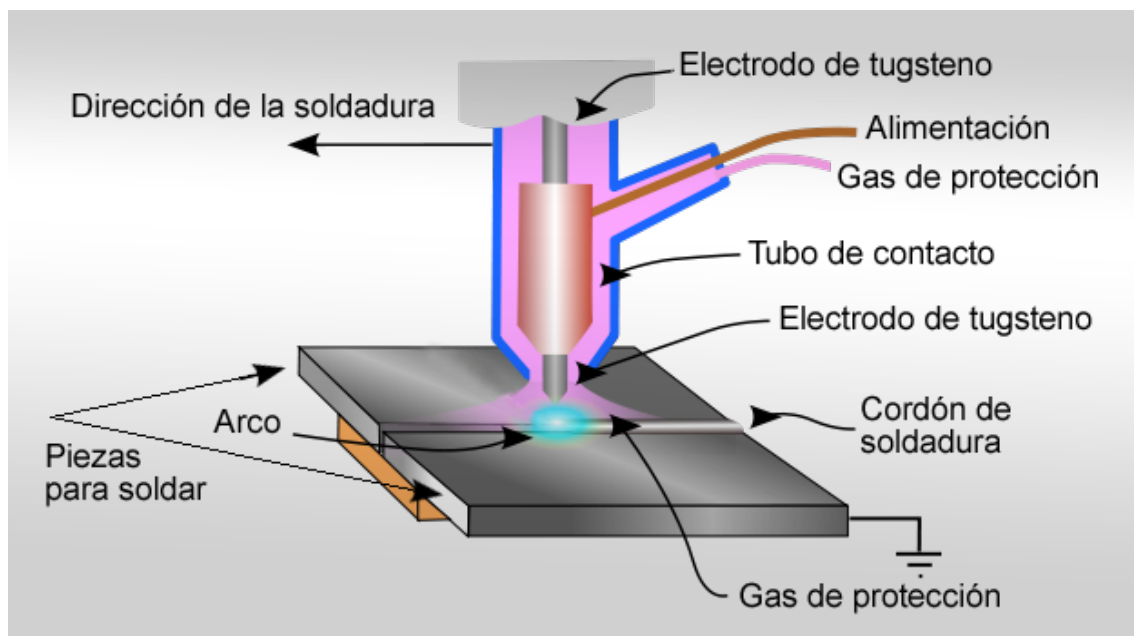


Figura 11.1. Esquema de la soldadura TIG.

11.3.- Montaje del módulo de entrada y salida del reactor

Los pasos a seguir para el montaje de los módulos de entrada y salida del reactor serán los siguientes. El proceso se realizará 2 veces (véase plano 1).

1. Preparación del tubo de $\text{Ø}25 \times 38 \text{mm}$: Los tubos de acero inoxidable 316L vienen en unidades de metro. Por lo tanto, para la fabricación del tubo, se cortarán a una longitud de 38mm, con el uso de una sierra. Tras ello, se refrentarán los extremos del tubo para corregir el corte realizado con la sierra, asegurando la perpendicularidad del plano con el eje del tubo.
2. Una vez se tiene el tubo preparado, se suelda a uno de los extremos, la reducción 25/12, mediante un cordón de soldadura TIG.

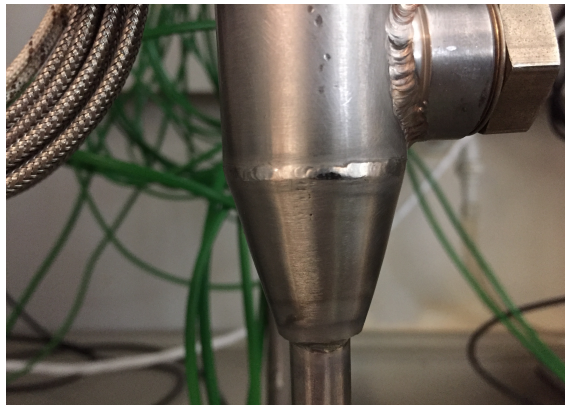


Figura 11.2. Conexión entre el tubo central y la reducción 25/12.

3. Al otro extremo del tubo, se suelda, de la misma manera que la anterior, la reducción 51/25.



Figura 11.3. Conexión entre el tubo central y la reducción 51/25.

4. Finalmente, al extremo de la reducción, se suelda la conexión clamp NW50.

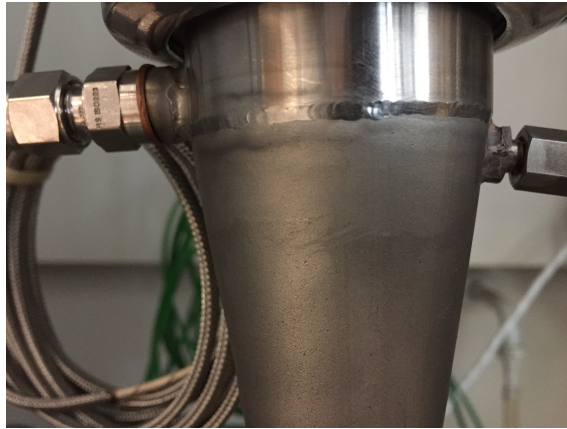


Figura 11.4. Soldadura entre la reducción 51/25 y la conexión NW50 Clamp.

5. Tras quedar definida la estructura del módulo de entrada y salida del reactor, se procede a la soldadura de los casquillos de acople para los diferentes sistemas de medición. Sobre el tubo $\text{Ø}25 \times 38\text{mm}$, se sueldan dos casquillos de M14x1.5, con una distancia entre ellos de 20mm. Por la parte contraria del tubo, se soldará un casquillo de $\frac{1}{8} \text{ npt}$ correspondiente al sensor de presión, en el punto central del tubo. Para terminar el montaje del módulo, el casquillo del termopar se suelda a la conexión clamp, alineado con los casquillos de M14X1,5. Finalmente, se soldará un casquillo de $\frac{1}{8} \text{ npt}$ correspondiente a la sonda de muestreo, alineada con el casquillo del sensor de presión.

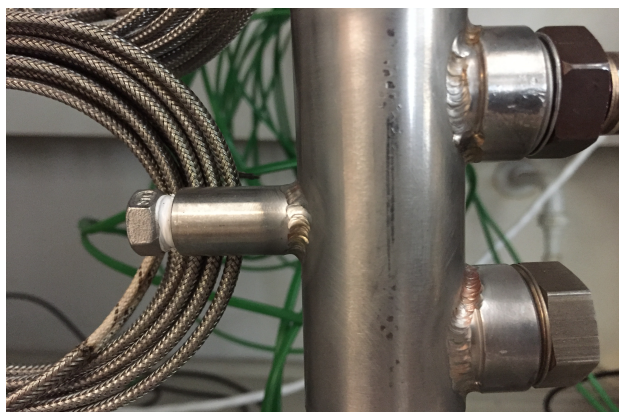


Figura 11.5. Soldadura de los casquillos de M14X1,5 y $\frac{1}{8} \text{ npt}$.

11.4.- Montaje del alojamiento central

El alojamiento central tiene 3 variaciones, cuyas dimensiones dependerán del número de monolitos a evaluar. El procedimiento de montaje es parecido al del modulo de entrada/salida del reactor. Basándose en la unión mediante el uso de cordones de soldadura TIG.

El montaje del alojamiento central, en cualquiera de las 3 variantes, se realizará en tres pasos:

1. Cortar el tubo de $\varnothing 50mm$ a la longitud correspondiente a la variante en cuestión.
2. Soldar a cada extremo del tubo central una conexión clamp NW50.
3. Para concluir la fabricación, se procede a la soldadura de los casquillos para las sondas de muestreo de $\frac{1}{8}npt$ (figura 9.7).

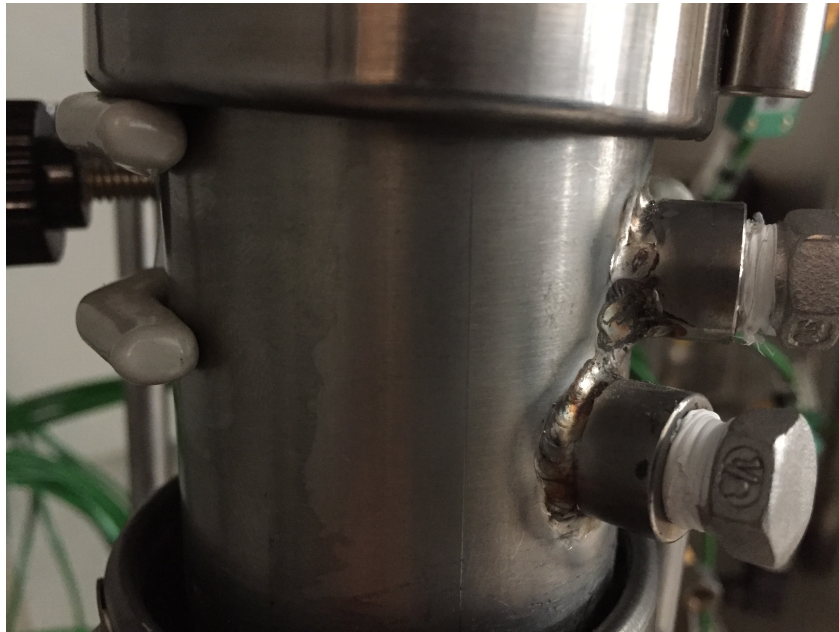


Figura 11.7. Soldadura de los casquillos $\frac{1}{8}npt$ al alojamiento central.

11.5.- Montaje del reactor

Para concluir el proceso de fabricación del reactor, se explicará la manera de montar los módulos y componer el reactor final. Se trata del ensamblaje de las piezas anteriormente fabricadas, mediante el uso de abrazaderas. Se realizará en tres pasos:

1. A un extremo del alojamiento central, se conecta el módulo de entrada del reactor. Insertar la junta PTFE entre los dos módulos. A continuación, se instala la abrazadera clamp NW50.



Figura 11.8. Conexión entre módulos.

2. Se realiza el paso 1 de nuevo para conectar el módulo central con el módulo de salida del reactor.
3. Finalmente, se conectan las sondas de muestreo, NO_x, oxígeno, sensores de presión y los termopares en sus respectivos lugares.



Figura 9.9. Conexión de sondas en el módulo de entrada.

11.6.- Fichas técnicas de los sistemas de medición utilizados

Analizador de gases HORIBA MEXA-6000FT

Aplicación: Medida de gases de escape de motores sin dilución

Estándar para Diesel/Gasolina: 18 componentes + NO/NO₂

Estándar para GNC: 16 componentes + NO/NO₂

Principio: Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Temperatura de la línea de toma de muestra: 113°C ± 6°C

Caudal de muestra: $4,0 \frac{l}{min} \pm 0,5 \frac{l}{min}$

Compuesto	Rangos de medida
Monóxido de carbono (CO)	0-200 ppm ; 0-1000 ppm; 0-5000 ppm; 0-2%; 0-10%
Dióxido de carbono (CO ₂)	0-1%; 0-5%; 0-20%
Óxido nítrico (NO)	0-200 ppm; 0-1000 ppm; 0-5000 ppm
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	0-200 ppm
Óxido nitroso (N ₂ O)	0-200 ppm
Agua (H ₂ O)	0-24%
Amoníaco (NH ₃)	0-1000 ppm
Dióxido de azufre (SO ₂)	0-200 ppm

Acetona (C₃H₆O)	0-200 ppm
Acetaldehído (CH₃CHO)	0-200 ppm
Formaldehídos (HCHO)	0-500 ppm
Ácido fórmico (HCOOH)	0-100 ppm
Metano (CH₄)	0-500 ppm
Etileno (C₂H₄)	0-500 ppm
Etano (C₂H₆)	0-200 ppm
Propileno (C₃H₆)	0-200 ppm
1,3-Butadieno (1,3-C₄H₆)	0-200 ppm
Isobutileno (iso-C₄H₈)	0-200 ppm
Benceno (C₆H₆)	0-500 ppm
Tolueno (C₇H₈)	0-500 ppm
NO + NO₂	Según escala elegida para cada componente

Tabla 11.2 Compuestos analizados en el Horiba MEXA-6000FT.

Sensor de NO_x HORIBA MEXA 720 NO_x

La hoja de calibración de la sonda MEXA 720 NO_x incluida se utiliza para comprobar los valores de calibración necesarios para evitar el mal uso y posible daño del sensor. Previo uso de la sonda, se tienen que comprobar los valores de calibración indicados en la hoja, siendo los valores más significantes Z, A y B.



Protocol for Mexa 720 NOx

custome Wärtsilä, Finland	project-No: S-2000562606
MFG No: WBKEEU2C	

INV-NO of Multimeter: 301320712
--

Sensor-No: **0710-5117**

calibration with synth. air and zerogas (N ₂) [wet]				
O ₂ -conc.:	20,10 Vol%			
Pos.gasdivider:	100%	40%	20%	0%
exp. value: [Vol%]	19,60	7,84	3,92	0,00
act. value: [Vol%]	19,60	7,77	3,86	0,00

calibration with special gas (H ₂ , CO ₂ , CO in N ₂) [wet]				
composition of mixing gas:				
H ₂ :	7,05	Vol%		
CO ₂ :	7,04	Vol%		
CO:	9,16	Vol%		
Pos.gasdivider:	100%	60%	40%	0%
λ exp. value:	0,654	0,754 +/-0,16	0,818 +/-0,16	1,000 +/-0,16
λ act. value:	0,654	0,750	0,813	1,000

calibration with 5120 ppm NO and zerogas (N ₂) [wet]			
Calibr.	MR:	compensated Conc. Ch:	measured concentration
Zero:	0 ppm	0 01	1 ppm
Middle:	1000 ppm	998 02	1000 ppm
Span:	2000 ppm	1997 03	2001 ppm
High:	3000 ppm	2995 04	2996 ppm

Calibr. of analog out 1:	ok
Calibr. of analog out 2:	ok

R ₀ :	Channel	
Z	7	625
A	8	2,260
B	9	0,1705

to avoid damage at Sensor
please verify configured values with these datas

Calibration data:		
O ₂ :	Channel	
O2Mspan	15	-18,71
O2zero	16	0,00
O2span	17	19,60
lin	29	2
λ:	Channel	
IPOMspan	25	-3,156
IPON2	26	0,002
IPOspan	27	3,328
NOx:	Channel	
NOzero	11	0
NOmid	12	998
NOspan	13	1997
NOhigh	14	2995
NOx:	Channel	
IP2zero	21	0,087
IP2mid	22	3,619
IP2span	23	7,080
IP2high	24	10,410
997 hPa / 21 °C		

André Glernardt
inspector

21.10.2010
date



Figura 11.10. Hoja de calibración de la sonda de NO_x.