



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Caracterización experimental de un catalizador de tres vías
para su aplicación en motores GLP

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

AUTOR/A: Loeri Bosín, Daniel

Tutor/a: Sanchis Pacheco, Enrique José

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022





Resumen

En la sociedad actual la producción de emisiones contaminantes es un problema recurrente debido a su impacto en el cambio climático y la salud de las personas, y los motores de combustión interna (MCIA) no son una excepción. Debido a esto desde la industria de la automoción se ha impulsado el desarrollo de tecnologías que se adapten a las normativas vigentes ejemplos de esto son los sistemas de combustión combinados, los cambios en el proceso de compresión, el EGR, las variaciones en la geometría de algunos componentes o incluso fuentes de energía diferentes.

Evidentemente, uno de los campos explorados con el objetivo de reducir las emisiones contaminantes producidas por los motores de combustión interna son los combustibles empleados. Uno de los que presenta grandes ventajas frente a los convencionales, sobre todo en los niveles de partículas sólidas y CO₂ es el autogás o gas licuado del petróleo.

Uno de los objetivos de este trabajo ha sido el comprender las diferencias en la reactividad de un catalizador de tres vías al reaccionar con una mezcla basada en el gas licuado del petróleo.

Por otro lado, se ha llevado a cabo un estudio del efecto de los parámetros de operación del motor sobre la reactividad del sistema de postratamiento. Para ello se seleccionaron los puntos de operación de la campaña experimental partiendo de un estudio previo en banco-motor llevado a cabo en el CMT Motores Térmicos, de este modo se aseguró que el análisis se llevaba a cabo usando parámetros de operación aplicables en condiciones reales de conducción

Los datos se introdujeron en el mezclador de la instalación experimental, la cual permitía monitorizar todo el proceso en tiempo real, de modo que se podían detectar las posibles averías o fallos durante el ensayo y actuar en consecuencia.

Palabras clave: GLP, emisiones, catalizador, postratamiento





Abstract

In today's society the production of pollutant emissions is a recurrent issue due to its impact on climate change and people's health, and internal combustion engines (ICE) are not an exception. Because of that, automotive industry has been developing technologies capable of adapting to current regulations, some examples of this process are combined combustion systems, changes at the compression stage, EGR, changes of some element's geometry or even different fuels.

Obviously one of the fields explored in order to reduce pollutant emissions generated by internal combustion engines are the fuels. The LPG presents a lot of advantages, specially taking into consideration the levels of solid particles and CO₂.

One of the goals of this work was to understand how the reactivity of the three way catalyst changes when it is reacting with a mixture based on liquified petroleum gas.

On the other hand, an study about how the parameters of operation affect the reactivity of the aftertreatment system was carried on. In order to do it some operating points were chosen from a previous experiment with a real engine made by CMT Motores Térmicos, doing so can ensure that the operation parameters are applicable in real drive conditions.

All the data regarding the mixture was introduced in the mixer of the experimental setup, this allows to follow the evolution of the experiment in real time so potential failures can be detected.

Keywords: LPG, emissions, catalyst, aftertreatment



ÍNDICE

Resumen	4
Abstract.....	6
Abreviaturas.....	10
1.Introducción	12
1.1 Motivación del estudio	12
1.2 Objetivos del trabajo	13
1.3 Metodología	13
2. Marco teórico.....	16
2.1 Emisiones contaminantes.....	16
Legislación	18
Objetivos y tecnologías actuales	18
2.2 Catalizador de tres vías (TWC).....	19
Postratamiento de gases de escape	19
Propiedades fundamentales de un catalizador	19
Estructura del catalizador.....	20
Concepto de TWC.....	22
2.3 Aplicación en motores propulsados por GLP.....	23
3. Instalación experimental	28
3.1 Esquema de la instalación de medida	29
3.2 Mezclador.....	30
3.3 Sistema de calentamiento	32
3.4 Instrumentación	34
FTIR MKS 2030.....	34
Caudalímetros	36
Agilent 990 Micro GC	37
Scada	38
Horiba Mexa 720	39
4. Campaña de ensayos.....	42
4.1 Planteamiento inicial y objetivos.....	42
Reactor	42
Comportamiento térmico.....	43
Verificación de los puntos de medida	43
4.2 Metodología experimental.....	44
4.3 Software	46

5. Discusión de resultados.....	56
5.1 Actividades previas.....	56
5.2 Curvas de <i>Light-off</i>	58
Ensayos Tipo I. (Humedad relativa 0%)	58
Ensayos Tipo II. (Humedad relativa 5%)	65
Ensayos Tipo III. (Humedad relativa 5%+ H ₂)	69
Eficiencias de conversión y formación de especies	72
Efecto sobre la temperatura de light-off	74
6. Conclusiones	78
7. Referencias.....	82
8. Anexos.....	84
Anexo 8.1. Factores de conversión de gases	84
Anexo 8.2 Especificaciones del CEM	85
Principio de operación	85
Purga del sistema	86
Anexo 8.3 Pliego de condiciones	87
Introducción	87
Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo (9)	87
Real Decreto 488/1997 del 14 de abril (10)	91
Anexo 8.4 Presupuesto	93
Mano de obra	93
Software	93
Hardware	93

Abreviaturas

A/F	Air fuel ratio
EGR	Exhaust gas recirculation
GLP	Gas licuado del petróleo
HCCI	Homogeneous Charge Compression Ignition
LCV	Light commercial vehicle
LTC	Low Temperature Combustion
NEDC	New European Driving Cycle
PC	Passanger cars
PCCI	Premixed Charge Compression Ignition
PM	Particulate material
rpm	Revoluciones por minuto
SV	Space velocity
TWC	Catalizador de tres vías
τ	Tiempo de residencia
UHC	Unburnt hidrocarbons
\dot{V}	Gasto volumétrico
WHTC	World Harmonised Transient Cycle
WLTP	World Light Vehicles Test Procedure



1.Introducción

1.1 Motivación del estudio

Hoy en día la mayoría de los vehículos que recorren las carreteras y vías de todo el mundo están propulsados por motores de combustión interna alternativos (MCIA), este tipo de vehículos aprovecha la energía química que proviene de la combustión que se da entre el combustible y el oxígeno.

La gran mayoría de combustibles empleados en este tipo de procesos son de origen fósil formados mediante procesos geoquímicos a lo largo de millones de años, posteriormente mediante un proceso de destilación se suele obtener el compuesto estrictamente necesario para llevar a cabo la combustión anteriormente mencionada. Dentro de este tipo de combustibles se encuentran el gas natural, carbón o el petróleo.

Si el proceso de combustión fuera ideal al quemar los hidrocarburos presentes en el combustible los productos serían agua H_2O y dióxido de carbono CO_2 . Sin embargo, en realidad esta reacción no se da de forma ideal interviniendo varios compuestos contaminantes del propio aire empleado y de los propios combustibles, a todo ello se le debe añadir compuestos procedentes del lubricante y las partículas de los ciclos de combustión anteriores, todo ello provoca que aparezcan especies dañinas tanto para el medio ambiente como para la salud humana.

Esto ha hecho indispensable que los sistemas de combustión evolucionen de modo que el impacto medioambiental sea reducido sin por ello prescindir de las prestaciones de las tecnologías actuales, ejemplos de ello son la recirculación de los gases de escape lo que permite reducir las emisiones de NO_x o el uso de sistemas de postratamiento que en función de los gases emitidos por el combustible usado permiten reducir en cierta medida las concentraciones de las especies contaminantes.

Durante este trabajo se ha empleado el GLP como alternativa a los combustibles convencionales con el objetivo de comprender su viabilidad y sus virtudes en cuanto a emisiones contaminantes se refiere. El uso del GLP no es novedoso en la industria automovilística y ya está siendo empleado en motores de vehículos destinados al transporte público en algunos países, cabe destacar que no es una alternativa definitiva para solucionar la problemática de los gases contaminantes debido a sus limitaciones de eficiencia y consumo, pero sí que es un combustible de transición que puede operar de forma coordinada, principalmente en motores de gasolina.

Habitualmente los sistemas que trabajan con GLP pueden ser incorporados a motores que inicialmente trabajaban con gasolina o diésel mediante un cambio en el sistema de alimentación y en la disposición del motor del vehículo. Cabe destacar que es más habitual esta transformación en motores de gasolina por lo que este estudio adquiere aún más sentido al ser el sistema de postratamiento un TWC.

1.2 Objetivos del trabajo

Teniendo en mente la motivación del estudio, la comprensión de la reactividad de un catalizador de tres vías en función de la mezcla gaseosa que lo atraviesa puede ayudar a comprender cuales son las zonas de operación óptimas de dicho sistema de postratamiento, además al variar los dosados de operación y al introducir vapor de agua e hidrógeno se ha podido analizar en mayor detalle los mecanismos de formación de NH_3 y N_2O .

El objetivo principal de este trabajo es, por tanto, caracterizar el funcionamiento de un catalizador de tres vías, habitualmente empleado para reducir CO , NO_x y HC en los motores de encendido provocado, sin embargo, se ha estudiado su reactividad empleando una mezcla de hidrocarburos representativa de la emisión motores propulsados por gas licuado del petróleo. Además, se ha tratado de entender y analizar los mecanismos de conversión de las especies introducidas, así como los de formación de especies nuevas.

Por lo tanto, el análisis llevado a cabo en este trabajo busca contribuir a la solución de uno de los 17 Objetivos del desarrollo Sostenible (ODS) impulsados por Naciones Unidas, concretamente se trata del decimotercero enfocado a las acciones que permitan tomar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.

1.3 Metodología

En este apartado se ha detallado el plan de trabajo seguido durante la realización del presente trabajo de fin de grado. Como se puede observar todo está organizado en la *Figura 1*.

Inicialmente, una vez decidida la temática, se ha realizado una descripción de los experimentos y actividades llevadas a cabo previamente en la instalación de medida, así como experimentos relacionados con la campaña de ensayos. Además, también se han concretado los objetivos del trabajo, así como la motivación del estudio realizado.

En el segundo capítulo se ha desarrollado el marco teórico y los conceptos esenciales sobre las emisiones contaminantes, el concepto de reactor catalítico y catalizador de tres vías, así como su aplicación en motores propulsados por GLP, todo ello permite comprender mejor el análisis realizado en los capítulos posteriores.

En el cuarto capítulo se procede a describir la instalación en la que se han realizado las actividades, también se introduce la campaña de ensayos realizada, los puntos ensayados y en qué condiciones se han realizado los experimentos.

Por último, en el quinto y sexto apartado se presentan todos los resultados obtenidos durante la campaña, además se aprovecha para comparar lo obtenido analizando el comportamiento de las diferentes especies involucradas durante el proceso.



Figura 1. Metodología de trabajo de fin de grado



2. Marco teórico

2.1 Emisiones contaminantes

La situación actual en cuanto a la regulación de emisiones es bastante restrictiva, ya que tanto en Europa como en EE.UU se impone que las concentraciones de especies contaminantes deben ser inferiores que las del aire en las zonas más contaminadas.

En la actualidad las emisiones reguladas son: NO_x , CO, UHC, CO_2 y PM, para los diferentes tipos de vehículos que las emiten. Cada una de estas especies tiene su propia regulación en lo que se refiere a concentración permitida en el aire ambiente, así como tamaño y concentración de partículas en un volumen determinado en el caso de las PM, esto se debe principalmente a lo potencialmente peligrosas que son para la salud humana y el medio ambiente. [1]

Óxidos de nitrógeno: NO_x

Los óxidos de nitrógeno es una forma de designar al NO, NO_2 y N_2O , habitualmente en los motores lo que se forma principalmente es NO, aunque puede llegar a aparecer una cantidad considerable de NO_2 en zonas de baja temperatura y elevada concentración de oxígeno.

Respecto a los efectos biológicos, químicos y fisiológicos que pueden llegar a provocar los NO_x están:

- Formación de ácido nítrico, uno de los componentes responsables de la lluvia ácida.
- Formación de sustancias productoras de smog fotoquímico.
- Irritación de los pulmones si el nivel de concentración es superior a 600 mg/m^3 .
- El NO participa en la reducción de la capa de ozono al ser oxidado.

Monóxido de carbono: CO

La formación de CO es un paso intermedio que se da durante la oxidación de un hidrocarburo y está muy ligado al dosado de operación. Normalmente, se forma en condiciones de mezcla rica o condiciones pobres, pero en casos donde se trabaje con mezclas heterogéneas.

En motores de combustión provocada la formación de CO se da por disociación del CO_2 a temperaturas próximas a los 2000 K, que son perfectamente alcanzables durante los procesos de combustión. A estas temperaturas el CO es estable, sin embargo, el enfriamiento de los gases rompe este equilibrio.

El monóxido de carbono es un compuesto tóxico para los seres vivos, ya que, llega a las células sanguíneas pegándose a la hemoglobina en lugar de al oxígeno por lo que se reduce la cantidad de oxígeno disponible dentro del cuerpo.[1]

Hidrocarburos sin quemar: UHC

Los hidrocarburos sin quemar se generan debido a la combustión incompleta del combustible empleado, los efectos de los hidrocarburos dependen de su estructura y composición molecular. Muchos de ellos son tóxicos, portadores de sustancias cancerígenas e irritantes, y algunos de ellos también producen, junto a los NO_x, el smog.

Los principales hidrocarburos sin quemar son el metano y los compuestos orgánicos volátiles. El metano, por su parte, puede generar la asfixia tras inhalación además de tratarse de un gas altamente inflamable.

Los compuestos orgánicos volátiles suelen estar formados por varios anillos aromáticos, a pesar de no estar regulados de forma individual presentan un nivel de peligrosidad muy elevado, debido a ello la Directiva Europea establece unos valores límite de exposición a estos compuestos, indicando el peligro que supone el contacto con estas sustancias. [1][3]

Dióxido de carbono: CO₂

Este compuesto es un producto de la combustión completa de los hidrocarburos o el carbón, al igual que el vapor de agua. En el caso del CO₂ se trata de un gas presente en la atmósfera debido a diversos procesos como la descomposición de la materia, respiración de los animales o los incendios forestales. A pesar de todo, es un gas que forma parte del proceso de fotosíntesis de las plantas por lo que de este modo los niveles de CO₂ en la atmósfera se regulan, sin embargo, al elevarse excesivamente debido al desarrollo industrial y a las emisiones procedentes de la combustión de combustibles fósiles se amplifica el conocido efecto invernadero.

Material particulado: PM

Dentro de este grupo se puede distinguir dos tipos las partículas primarias, las que se forman directamente como producto de la combustión y se miden a la salida del cilindro, y las secundarias que son el resultado del proceso de dilución en el aire ambiente, son precisamente estas últimas las que están limitadas por la normativa vigente.

Los principales efectos son la evidente suciedad ambiental que implica la presencia de estas sustancias, a su vez tienen un gran impacto sobre el sistema respiratorio humano desde irritación hasta efecto cancerígeno a largo plazo.[3]

Legislación

Euro es el nombre que recibe la legislación que estandariza las emisiones en Europa, esta normativa, a su vez, ha sufrido variaciones con el paso del tiempo que la han vuelto aún más restrictiva, actualmente la normativa que regula las emisiones para coches de pasajeros (PC) es Euro 6d, siendo uno de los cambios más destacables los ciclos de homologación de los vehículos.

Inicialmente se empleaba un ciclo denominado como NEDC (New European Driving Cycle), se trata de un ciclo de homologación que se lleva a cabo en el laboratorio y se centra en que el vehículo no supere los límites en cuanto a emisiones y consumo de combustible, y el objetivo era simular las condiciones de operación típicas para vehículos de categoría LCV y PC, sin embargo, presentaba limitaciones importantes como:

- Falta de correlación con el funcionamiento real del motor
- Condiciones ambientales distintas
- No se tienen en cuenta los elementos auxiliares (AC, audio...).
- Mismas condiciones de operación para todos los vehículos independientemente de sus características (rpm, cambios de marcha...).

Debido a todo ello se reemplazó por el WLTP (World Light Vehicles Test Procedure) y el WHTC (World Harmonised Transient Cycle), de modo que se solucionaran todas las limitaciones del ciclo previo (auxiliares, temperatura de operación...) y además se añadieron regulaciones para nuevas especies como etanol, NO₂, N₂O y NH₃. Por último, otra nueva característica de este tipo de ciclos fue la capacidad de llevar a cabo pruebas de consumo de energía en vehículos híbridos o eléctricos.

Finalmente, otro ciclo de homologación que se está empleando es el RDE (Real Driving Emissions), se trata de un ciclo que se lleva a cabo en condiciones de operación normales tanto en vía urbana, rural como carretera de modo que se obtienen los datos más fiables en lo que respecta a emisiones contaminantes. [2]

Objetivos y tecnologías actuales

Los principales objetivos de cara a los próximos años en el campo de las emisiones contaminantes pasan por:

- Mejora en el control de la composición de la mezcla previa al encendido (EGR).
- Mayor uso de combustibles sintéticos.
- Aumento de las eficiencias de los motores de combustión interna.
- Nuevos sistemas de inyección basados en el control electrónico.
- Investigación de nuevas técnicas de combustión: combustión diluida, combustión de mezcla estratificada, HCCI, LTC, PCCI...
- Mayor comprensión de los sistemas de postratamiento.

2.2 Catalizador de tres vías (TWC)

Postratamiento de gases de escape

Las temperaturas alcanzadas por los gases de escape en motores de encendido provocado pueden alcanzar los 900°C a plena carga, el contenido de estos suele consistir, fundamentalmente, elevadas cantidades de N₂, entorno al 75%, además de CO₂ y H₂O como productos de la combustión. A todo ello se le deben añadir otros compuestos, provenientes de un proceso de combustión incompleto y aditivos del combustible o lubricante. Estos contaminantes se encuentran habitualmente en desequilibrio químico por el rápido enfriamiento de los gases al ser expulsados, debido a ello estos gases de escape tienden a estar formados por elementos oxidantes como O₂ o NO_x y otros reductores como UHC, CO o H₂. Teniendo esto en cuenta los dispositivos de postratamiento de emisiones se colocan en la línea de escape del motor para evitar su emisión a la atmósfera, ya sea, destruyéndolas mediante reacciones químicas o atrapándolas y acumulándolas durante un cierto periodo de tiempo.[1]

Propiedades fundamentales de un catalizador

Para desarrollar mejor el concepto de TWC se debe definir el concepto de reactor catalítico, siendo este un sistema de tratamiento de gases basado en el efecto catalítico de ciertos materiales y compuestos sobre los gases de escape.

El efecto catalítico anteriormente mencionado, según Wilhem Ostwald, es la capacidad que tienen algunas sustancias de acelerar el ratio con el que se da una reacción química sin formar parte de la misma, ni como reactivo, ni como producto, de modo que su mera presencia permite que se den ciertas reacciones con una energía de activación menor. [2]

Estas son las propiedades fundamentales que se deben tener en cuenta a la hora de modelar el comportamiento de un catalizador.

Actividad

Esta propiedad permite entender que tan rápido se va a dar la reacción en cuestión. Si dos catalizadores tienen un impacto similar en una reacción química, el que sea más activo producirá un ratio de reacción mayor.

Selectividad

Propiedad que indica que cantidad de reactivos se convierten los productos deseados en lugar de darse otras conversiones no deseadas. Según Sabatier una mayor selectividad en un catalizador viene acompañada de un deterioro de su actividad.

Estabilidad

Propiedad relacionada con la resistencia al deterioro químico, mecánico y térmico a lo largo del tiempo de operación de un catalizador.

Light-off

En teoría se entiende como *light-off* a la temperatura necesaria para que se inicie la reacción, sin embargo, dado que el ratio de reacción incrementa con la temperatura, normalmente, se define como la temperatura a la que la conversión de eficiencia es un 50%.

Otro término relacionado son las curvas de light-off o de encendido, este tipo de curvas muestran la eficiencia de conversión de una determinada especie en función de la temperatura a la que la mezcla pasa a través del catalizador, la cual se hará variar linealmente en el caso de la campaña de ensayos llevada a cabo.

Ventana del catalizador

Un aumento de las temperaturas no conlleva, necesariamente un incremento de la tasa de reacción, esta relación solo se da en una ventana de temperaturas, esto es debido a que además de la reacción deseada también están dándose otras reacciones a la vez, esto hace variar las concentraciones de los reactivos y el equilibrio químico. Como se puede observar en la figura 1. La eficiencia de conversión de un catalizador con una mezcla homogénea se encuentra muy próxima a las condiciones estequiométricas, lo que se pone un rango relativamente reducido.[1]

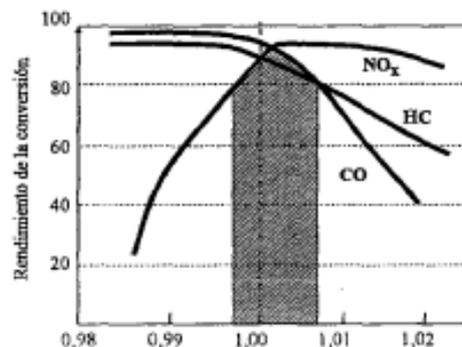


Figura 2. Rendimientos de conversión de CO, HC y NO_x para un catalizador con mezcla homogénea [1]

Estructura del catalizador

Respecto a la estructura del catalizador, generalmente se pueden diferenciar tres elementos: el sustrato o soporte, el recubrimiento o washcoat y el elemento catalizador.

El substrato o soporte es el elemento sobre el que se depositan las sustancias que van a reaccionar, debe estar diseñado para soportar elevados gradientes térmicos y vibraciones. Se busca, por tanto, que este elemento presente una baja inercia térmica, suficiente resistencia mecánica, alta porosidad y baja pérdida de carga frente a las corrientes de escape. En cuanto a los materiales empleados inicialmente se optaba por esferas de alúmina sinterizada, sin embargo, actualmente se utilizan monolitos cerámicos o de matrices metálicas.

Los monolitos cerámicos suelen estar conformados por celdillas que pueden adoptar diferentes formas con el fin de optimizar la superficie de contacto con el flujo de gases (Ver figura 3.)

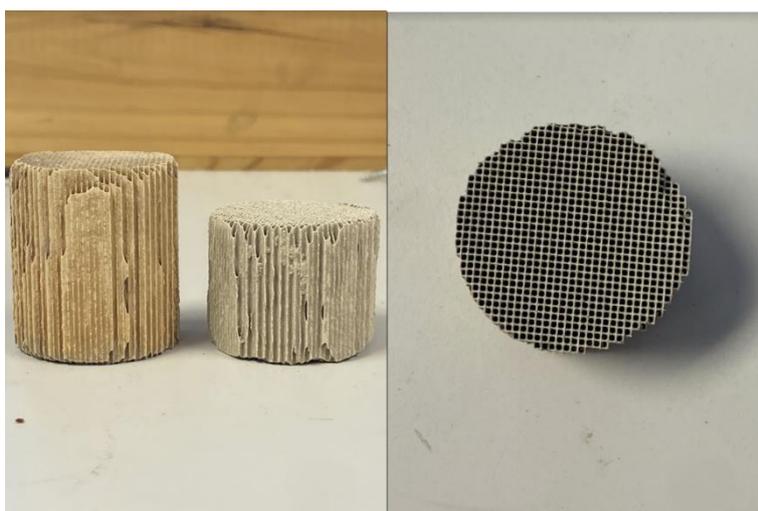


Figura 3. Monolitos de matriz cerámica

En lo referente a substratos de matriz metálica, la estructura se basa en laminas intercaladas formando una estructura similar a los paneles de abeja. Los soportes metálicos se caracterizan por tener una menor inercia térmica y mejor comportamiento en arranque en frío en comparación a los cerámicos, sin embargo, presentan un mayor peso específico.

Por otra parte, la relación entre el diámetro medio y la longitud del monolito es un parámetro que adquiere una gran importancia, ya que, va a definir el tiempo de residencia de las reacciones químicas que se den, si este es muy corto las reacciones no se completarán, dando como resultados productos indeseados, pero, si este es largo, aumentará la longitud del monolito y con ello el peso y el coste. Otros parámetros relevantes son el espesor de pared o la densidad de celda que tendrán un gran impacto en la caída de presión dentro del catalizador y en última instancia, se verá reflejado en el rendimiento de conversión.

El recubrimiento o washcoat se trata de un material de elevada porosidad que aumenta la superficie de contacto interna entre flujo de gases y material activo. Algunos de los materiales habitualmente empleados en los recubrimientos son los óxidos (alúmina, óxido de cerio, óxido de silicio, óxido de zirconio...) o zeolitas que son

silicatos de aluminio, cuya estructura tetraédrica hace que el tamaño de sus poros sea bastante uniforme. Por otro lado, cabe destacar, el caso del óxido de cerio, que suele tener un papel importante en las eficiencias de conversión de los TWC debido a su capacidad de almacenamiento de O_2 .

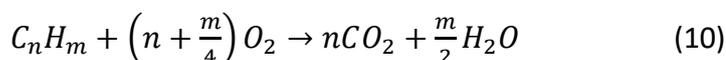
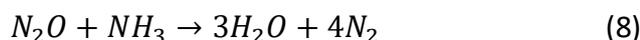
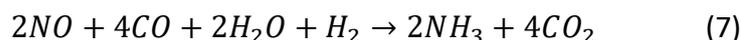
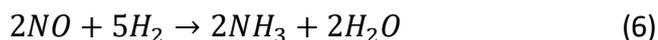
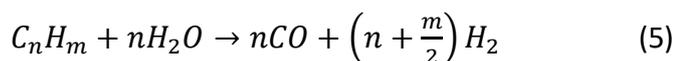
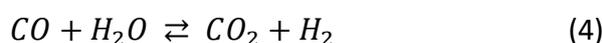
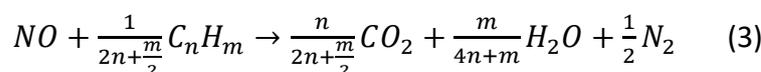
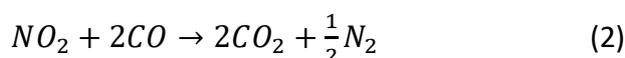
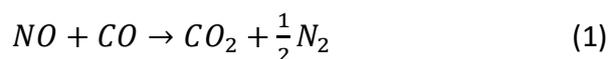
Por su parte, el material catalizador normalmente está compuesto por metales preciosos como el rodio, paladio o platino, estos materiales presentan una elevada actividad para las reacciones químicas que se dan en los sistemas de postratamiento de gases de los vehículos actuales.[1]

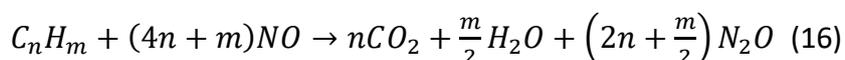
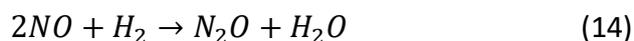
Otros elementos que se encuentran dentro de un reactor catalítico son los estabilizadores y los promotores que son sustancias activas o inactivas que se añaden en pequeñas cantidades para modificar las características fundamentales del material catalítico en cuestión.[2]

Concepto de TWC

Habitualmente un catalizador puede comportarse como uno de oxidación o de reducción en función del dosado de la mezcla durante la combustión. Se conoce como catalizador de tres vías a aquel que actúa frente a CO y UHC, oxidándolos y frente a NO_x reduciéndolos. [1]

Las reacciones químicas que se tienen en cuenta para modelar el comportamiento del catalizador de tres vías son las siguientes:





Sin embargo, es necesario recalcar que a la hora de modelar un TWC se pueden encontrar más de 30 reacciones secundarias que se pueden dar en función del modelo con el que se esté trabajando y esto tiene un gran impacto a la hora de analizar el funcionamiento del catalizador, afectando claramente a los rendimientos de conversión y a la formación de nuevas especies.

En el caso del modelo empleado las tres primeras reacciones corresponden a las reacciones de reducción de NO_x , en este caso se han introducido las de formación del NO, sin embargo, la reducción de N_2O y NO_2 se rigen por reacciones análogas a estas, en las que participan las mismas especies. Las reacciones 4-5 corresponden al mecanismo de formación de H_2 , por su parte, la 6 y la 7 introducen los mecanismos de formación del NH_3 . A su vez, la 8 representa la reducción del N_2O con NH_3 . Por otro lado, desde la reacción 9 hasta la 13 se presentan las reacciones de oxidación y, por último, de la 14a la 16 se introducen las reacciones de producción de N_2O .

Una de las características de este tipo de sistemas es que su eficiencia de conversión decrece a medida que la mezcla se aleja de las condiciones estequiométricas, teniendo una ventana de muy estrecha. Este tipo de catalizadores suelen emplearse en motores de encendido provocado y necesitan que el motor disponga de un sistema del control de la mezcla preciso. Normalmente este sistema suele ser un bucle cerrado con una sonda λ en el tubo de escape. Si la sonda detecta exceso de oxígeno el sistema enriquecerá la mezcla, de lo contrario de se empobrece.[1]

2.3 Aplicación en motores propulsados por GLP

El Autogás o gas licuado del petróleo (GLP) es un combustible basado en una combinación de hidrocarburos entre los que predominan el propano (C_3H_8) y el butano (C_4H_{10}) entre otros muchos como el propileno o el butileno.

Una peculiaridad de este combustible es que es gaseoso a presión y temperatura ambientes, sin embargo, al elevar la presión moderadamente pasa a estado líquido lo

que facilita el transporte, teniendo una relación de 1 litro de líquido por cada 270 litros de gas.

El GLP presenta varias ventajas en el marco de las emisiones, por un lado, se reducen prácticamente al completo las emisiones de partículas sólidas por el escape, por otra parte, el tener una alta relación hidrógeno/carbono (2.5-2.6) provoca la reducción de las emisiones de CO₂ al ambiente. Además, respecto a las emisiones de NO_x, estas disminuyen sobre todo si son comparadas con las emisiones de los vehículos de gasoil y como ventaja adicional presentan una gran mejora en lo que respecta a emisión de ruido.

Respecto al método de obtención la refinación de derivados del petróleo es una opción, pero no es la principal, ya que tanto butano como propano son hidrocarburos relativamente fáciles de encontrar en la naturaleza en los mantos petrolíferos.

Algunas de las propiedades más notables del GLP son:

- Relativamente económico sobre todo teniendo en cuenta su rendimiento
- Mezcla más controlada y por tanto combustión más completa
- Reducción de los depósitos carbonosos
- Mejor funcionamiento a cargas parciales
- Huella de carbón 20% inferior a la del diésel

En cuanto a las posibles desventajas que presenta el GLP como combustible en MCI se encuentran:

- Dificultad para lubricar
- Mayor deterioro del asiento de las válvulas
- Posibles problemas de corrosión a largo plazo en el sistema de inyección.

El GLP es útil en vehículos que operen con ciclo Otto y Diésel, pero estos deben ser transformados para adaptarse al nuevo combustible sobre todo en todo lo que involucra el sistema de inyección. En muchos casos estos vehículos van equipados con una bomba que permite discernir entre el modo de operación normal y el de GLP permitiendo al usuario usar uno u otro en función de lo que se desee a excepción de los arranques donde por defecto se harán en modo normal hasta que se alcancen las condiciones de operación propicias para cambiar el combustible.

Este combustible también admite el uso de catalizadores de tres vías, con el objetivo de reducir CO, NO_x y HC.

El uso del autogás como combustible en motores de combustión interna no es novedoso, y debido a su habilidad para reducir emisiones y al resto de propiedades anteriormente expuestas, ya ha sido empleado en motores de vehículos empleados para el transporte público como es el caso de los taxis en Corea del Sur o en autobuses adaptados para su uso.



El GLP es un combustible que reduce las emisiones en comparación a los motores que operan con gasoil o diésel, siendo la integración en el primero más sencilla que en el segundo. Es, por tanto, una gran alternativa como primer paso para la iniciar el proceso de cambio hacia combustibles más sostenibles y verdes (GNC, hidrógeno, electricidad...).[3][4]





3. Instalación experimental

En este apartado se presenta el banco de gases sintéticos utilizado para caracterizar los dispositivos de postratamiento (ver *Figura 4*).

En primer lugar, se tiene el mezclador de gases que se controla mediante el software SCADA y permite generar mezclas con composiciones similares a las presentes en el gas de escape de un motor de combustión interna (MCIA), utilizando hasta 14 especies gaseosas diferentes y con la posibilidad de humedecer la mezcla mediante un vaporizador.

Posteriormente, la mezcla fluye a través de un serpentín dentro de un horno eléctrico para alcanzar temperaturas representativas del gas de escape, aproximadamente entre los 100°C y 700°C.

Adicionalmente, el montaje experimental tiene implementada una línea de bypass que es utilizada para verificar la composición de la mezcla de gases antes de iniciar los ensayos y se controla mediante las válvulas $V1$ y $V2$.

Por último, la mezcla de gases fluye en un reactor, dispuesto a la salida del horno y que contiene la muestra del monolito analizada. El reactor está instrumentado con un sensor de presión $P1$ y cuatro termopares ($T3, T4, T5$ y $T6$), junto con las sondas utilizadas para conectar los analizadores de gases y medir la composición de la mezcla aguas arriba y abajo del reactor.

Los analizadores de gases disponibles en el montaje experimental son un FTIR MKS-2030 para medir compuestos químicos; una sonda lambda que permite medir la ratio entre el aire y el combustible relativo, el dosado, la concentración de oxígeno O_2 y de óxidos de nitrógeno (NO_x); y un cromatógrafo cuya columna permite medir diferentes especies gaseosas, pero de momento es utilizado únicamente para medir la concentración de hidrógeno H_2 en la mezcla de gases.

Todos los elementos que componen esta instalación y sus principales componentes son presentados con mayor detalle en las siguientes secciones de este apartado.

3.1 Esquema de la instalación de medida

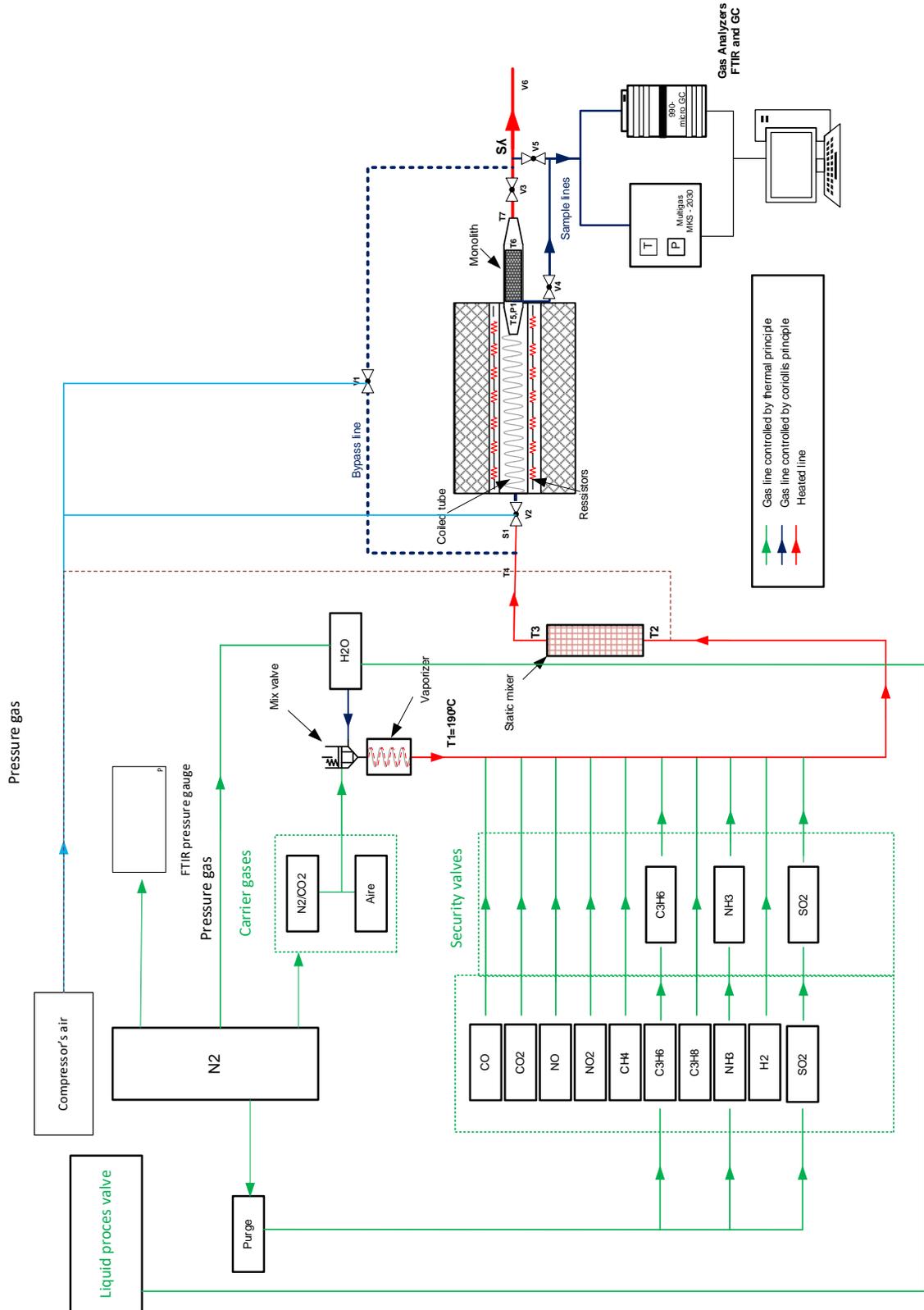


Figura 4. Esquema Instalación experimental

3.2 Mezclador

Este elemento de la instalación experimental se muestra en la figura 5. y permite generar la mezcla de gases y homogeneizarla en un mezclador estático. La mezcla se forma controlando los gastos volumétricos a través del software SCADA, el cual transmite la información demandada por el usuario a los controladores del flujo que son dispositivos conectados de manera independiente cada una de las botellas que contienen los gases sintéticos.



Figura 5. Mezclador de gases de Iberfluid instruments

En cuanto a los caudalímetros, cabe destacar que se pueden diferenciar dos tipos, están los empleados para los gases de arrastre que esta campaña de ensayos son el N_2 y aire sintético, y por otro lado están el resto de especies disponibles. La gran diferencia se encuentra en los gastos volumétricos máximos que admiten los caudalímetros de las especies mayoritarias son superiores, esto se debe tener en cuenta a la hora de estabilizar la mezcla de gases antes de empezar el ensayo ya que las especies predominantes influyen bastante en este proceso son las que deben estabilizarse en primer lugar.

Respecto la forma de emplear el nitrógeno durante los ensayos, este cumple bastantes tareas en esta parte de la instalación entre ellas destacan:

- Presurización del depósito de agua
- Aporte a la válvula N_2/CO_2 de gases de arrastre
- Purga de especies peligrosas
- Presurización de la línea de purga del FTIR

Debido a que se emplea en multitud de tareas es esencial monitorizar las condiciones en las que se encuentra empleando los diferentes instrumentos que se describen en la sección 3.4 y los diferentes manómetros disponibles en la instalación.

Por su parte, el aire del compresor se suele emplear para presurizar las válvulas de la línea principal y la del bypass que se encuentran en el circuito de calentamiento. Otro de sus posibles usos es ir conectado a la entrada del mezclador estático mientras se realiza la puesta en marcha de los equipos. Debido a la presencia de impurezas tales como hidrocarburos o elevado porcentaje de dióxido de carbono, se opta por el aire sintético a la hora de realizar los ensayos lo que le añade complejidad a la instalación, pero garantiza mayor fiabilidad en los resultados obtenidos.

Por último, en lo que se refiere al funcionamiento de la línea de agua, se debe verificar antes del ensayo si hay agua presente en la línea, para ello se abre la llave azul de la *figura 5*. y si es posible se limpia la línea de agua. Además, previamente se debe verificar el nivel de agua en el equipo y rellenar con agua destilada si se estima que está por debajo del nivel requerido, para ello abrir la llave roja que acciona la válvula de llenado que se encuentra en la zona superior del depósito y rellenar en la parte superior del banco con agua destilada.



Figura 6. Línea de agua y vaporizador de la instalación (izquierda), depósito de agua (derecha)

3.3 Sistema de calentamiento

El sistema que se usa para calentar la mezcla gaseosa generada consiste en un horno eléctrico que opera con una potencia máxima de 2000 W y una temperatura máxima de 1100°C dependiendo del flujo de gases y de las condiciones de operación

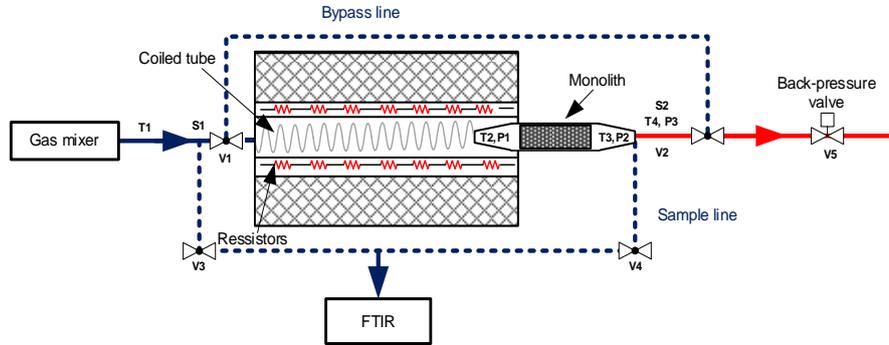


Figura 7. Esquema horno eléctrico de la instalación

La línea de bypass es controlada por las válvulas V1 y V2, con ellas es posible desviar el flujo de gases dependiendo de si es necesario elevar su temperatura. Por su parte la temperatura T2 permite comprender las condiciones térmicas a las que entra el flujo al reactor.

Los datos deben introducirse en el sistema para el inicio de un ensayo son:

- Gradiente térmico temporal en °C/min
- Temperatura máxima de operación del horno

En cuanto al funcionamiento térmico del propio la propia instalación, como se puede intuir al observar la *figura 8.*, al aumentar la temperatura a la salida del horno del horno, aumenta la temperatura a la entrada del reactor.

Además, se puede observar claramente como a gastos bajos las temperaturas son inferiores, esto se da porque la temperatura de los gases tiene más tiempo para enfriarse en estos casos.

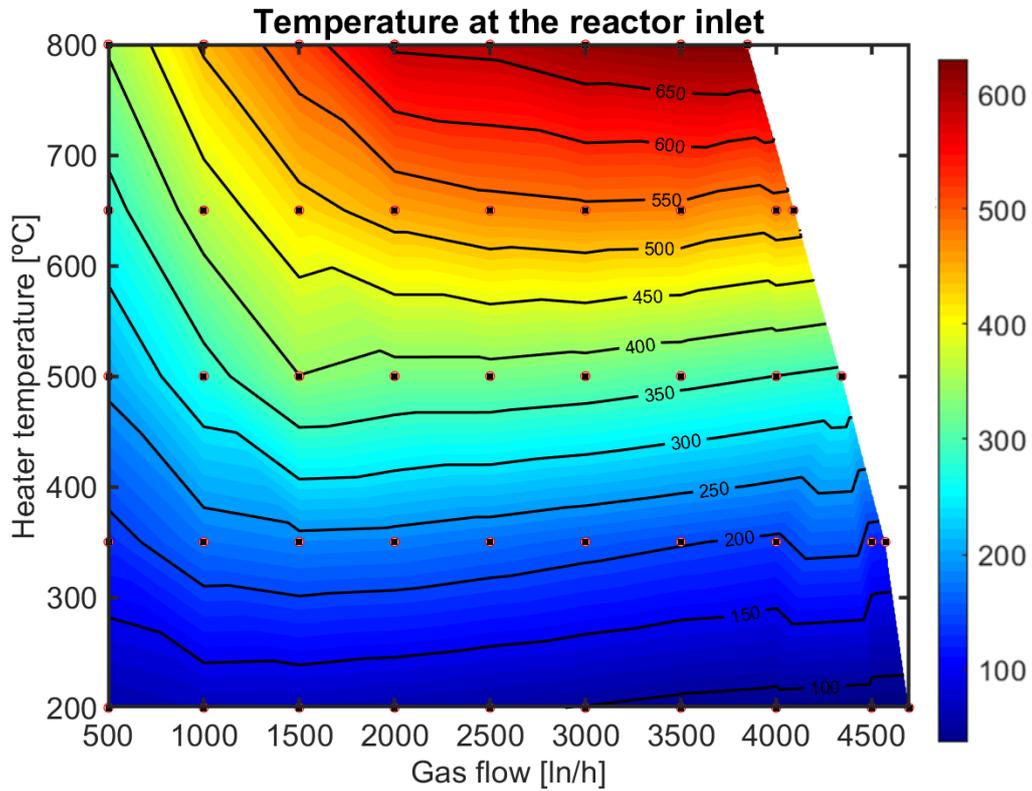


Figura 8. Comportamiento del sistema de calentamiento

Por último, se debe verificar el encendido de las resistencias constatando que el testigo situado en la parte inferior izquierda del panel frontal parpadea con una luz de color naranja (ver figura 9.)



Figura 9. Panel frontal del horno eléctrico

3.4 Instrumentación

FTIR MKS 2030

Se trata de un equipo que funciona basándose en el principio de espectrometría con infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR), básicamente las especies de una muestra se determinan a partir de la radiación absorbida por parte de las moléculas que la componen.

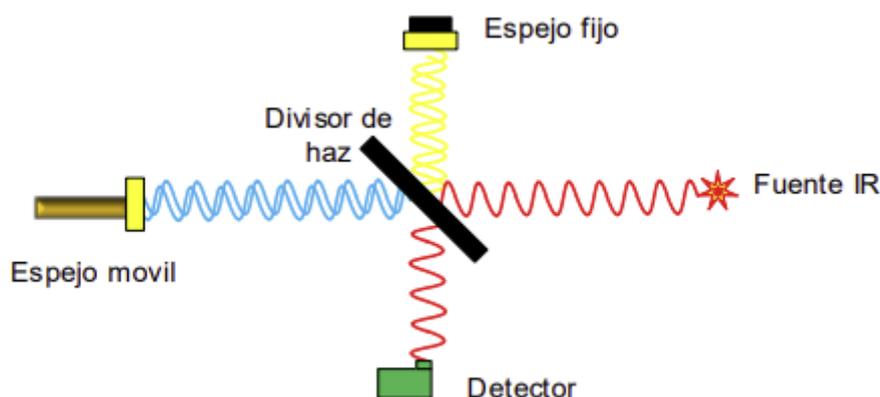


Figura 10. Esquema simplificado del funcionamiento del FTIR

Tal y como se puede observar en la *figura 10*, tras pasar por el divisor de haz parte de la luz será reflejada hacia un espejo móvil y otra parte al espejo fijo. Posteriormente el detector captará un espectro de referencia y de este modo cuando aparezca una sustancia distinta en el flujo el aparato obtendrá un espectro diferente mediante la Transformada de Fourier, con dicho espectro se podrá cuantificar e identificar las diferentes especies presentes en el flujo de gases. [5]

Respecto a las partes del equipo en la parte frontal se pueden ver los indicadores de temperatura, los caudalímetros del equipo, tanto el detector de purga como del modulador y los testigos de alimentación eléctrica y conexión de datos.



Figura 11. Parte frontal FTIR MKS 2030

En la parte trasera del equipo se pueden identificar los puertos de conexión para la transferencia de los datos con el ordenador *figura. (12-b)*, el ventilador para la refrigeración del equipo *figura. (12-c)*, filtro para la entrada de la muestra *figura. (12-d)*, entrada de N₂ gas para la purga del equipo *figura. (12-e)*, fusibles *figura. (12-f)* y botón de encendido del equipo *figura. (12-g)*. [5]



Figura 12. Parte trasera FTIR MKS 2030

Por último, en la parte superior del equipo se encuentra la entrada de N₂ líquido que es lo que se emplea para refrigerar el sistema.

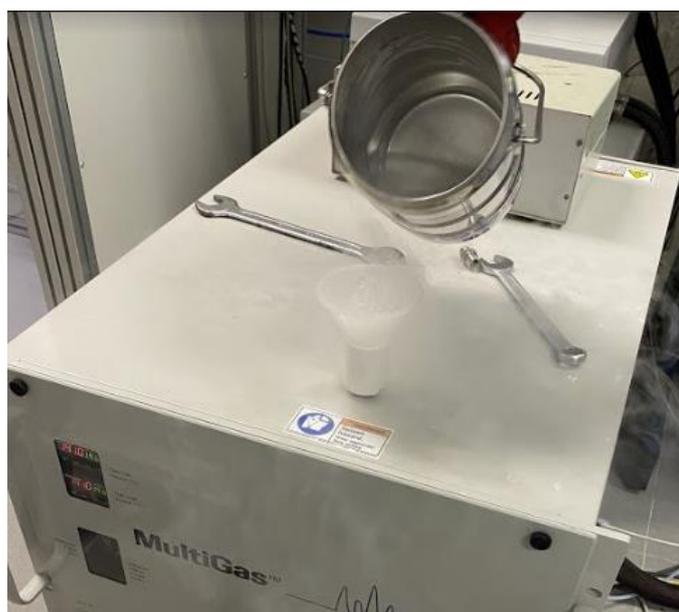


Figura 13. Parte superior FTIR MKS 2030

Caudalímetros

Los caudalímetros empleados funcionan basándose en el principio de Coriolis, este tipo de caudalímetros están formados por varios tubos que oscilan debido un elemento excitador, de esta manera, al pasar un fluido los tubos oscilan y dependiendo del desfase temporal y espacial detectado se obtiene de forma directa el caudal másico del fluido. Una de las ventajas de este tipo de caudalímetros es la capacidad de medir densidad y temperatura de forma simultánea, además del propio caudal.

Es importante destacar la gran precisión de medida de este tipo de equipos, que habitualmente se aproxima a $\pm 0.1\%$ de la lectura e incluso en algunos casos puede llegar a ser del $\pm 0.05\%$. [6]

Otra peculiaridad de los caudalímetros del mezclador es que cada uno tiene un rango de caudal volumétrico de operación distinto como se puede observar en la *Tabla 2*. estas son las principales características:

Especie	Caudal volumétrico límite [ln/h]		
Aire	200-10000	➔	Presión max. 64 barg
N ₂ /CO ₂	166-8300		Presión int. 4 barg
CO	2-100		Presión ext. 0-1 barg
CO ₂	0.4-20		Rango T ^a -10°C, 70°C
N ₂ x 2	2-100	➔	Presión max. 64 barg
H ₂	0.16-8		Presión int. 2-3 barg
C ₃ H ₈	0.16-8		Presión ext. 0-1 barg
C ₃ H ₆	0.95-45		Rango T ^a -10°C, 70°C
CH ₄	0.16-8	➔	Presión max. 10 barg
NO	0.2-12		Presión int. 1-2 barg
NO ₂	0.2-120		Presión ext. 0-1 barg
SO ₂	0.01-0.5		Rango T ^a -10°C, 70°C
NH ₃	0.16-8		

Tabla 1. Características caudalímetros del mezclador

Por último, otra característica del equipo es que permite cambiar los fluidos de trabajo empleando el factor de conversión correspondiente a la especie deseada, estos factores han sido proporcionados por el propio fabricante del mezclador y han sido adjuntados en el *Anexo 1*.

En base los límites de operación de cada caudalímetro y los factores de conversión de cada especie necesaria en los ensayos se ha estimado que la siguiente disposición del mezclador es la óptima para llevar a cabo la campaña:

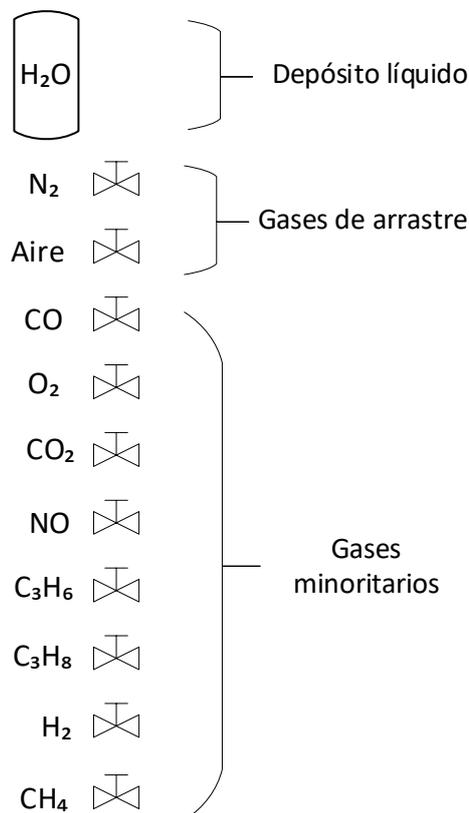


Figura 14. Disposición final de las especies introducidas en el mezclador.

Agilent 990 Micro GC

Sistema empleado para la medición de las concentraciones de H_2 en los ensayos necesarios, para ello se empleará un software que funciona vía Ethernet. El equipo emplea como gas de arrastre argón y las muestras medidas se encuentran en las columnas del mismo, a partir de los datos recopilados en las "columnas" del dispositivo el software realiza una integración del área por debajo de la señal medida y mediante una conversión de milivoltios a ppm se registran las concentraciones de las especies.

Cabe mencionar que el dispositivo permite realizar medidas de N_2 y O_2 en función del rango temporal en el que aparezca el cambio de pendiente en la señal medida.

Scada

Software que permite controlar el mezclador de la instalación de ensayos, en concreto permite regular los gastos volumétricos impuestos en los caudalímetros de las catorce especies disponibles. También permite monitorizar las temperaturas en los puntos críticos de la instalación tales como a la entrada y la salida del horno, a la salida del monolito o antes y después del mezclador estático

Esta herramienta también resulta útil a la hora de realizar seguimientos temporales de las diferentes variables a lo largo del ensayo mediante la opción “GRÁFICAS”

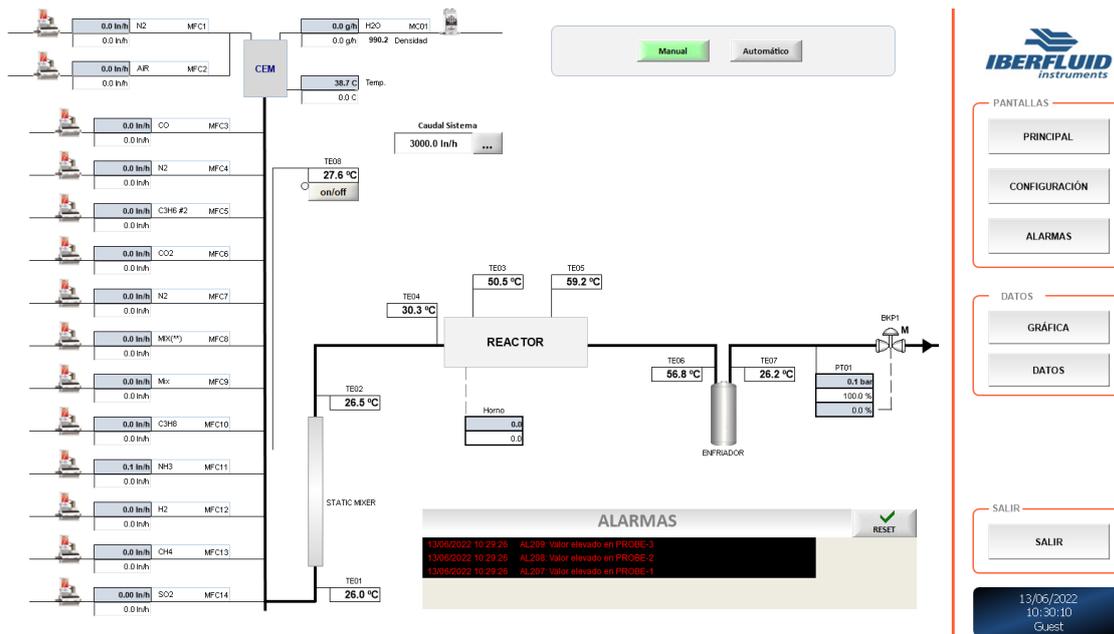


Figura 15. Pantalla principal Scada

En primer lugar, se debe seleccionar la temperatura de la mezcla que coincidirá con la temperatura del vaporizador y encender la resistencia del mezclador para iniciar cualquier ensayo.

Posteriormente, se procede a introducir los gastos de cada especie de la mezcla empezando por las mayoritarias y finalizando por las de menor gasto, ya que de ese modo se alcanza la estabilidad de la mezcla de forma más eficiente como se verá más adelante.

Horiba Mexa 720

Horiba Mexa-720 es un analizador de gases que funciona con sensores cerámicos y es el equipo empleado para el registro de las concentraciones de oxígeno durante el ensayo, además permite visualizar según se necesite el valor del dosado y la relación A/F y la concentración de NOx todo ello facilita la comprensión del punto de operación ensayado en todo momento.



Figura 16. Sonda lambda Horiba Mexa 720

El banco de gases tiene dos sensores colocados a la entrada y la salida del reactor (S1 y S2) como bien se puede apreciar en la *figura 15*.





4. Campaña de ensayos

4.1 Planteamiento inicial y objetivos

Durante la campaña de ensayos se ha buscado emular unas concentraciones similares a las del GLP y llevar a cabo una caracterización del sistema de postratamiento en este caso el catalizador de tres vías. Para realizar la caracterización se optó por esbozar las curvas de arranque en frío o light-off realizando variaciones de λ , sin alejarse de las condiciones estequiométricas, con el objetivo de comprender como interaccionan las especies químicas en el flujo de gases y el TWC dentro de un rango de temperaturas entre 100 °C y 850 °C.

A lo largo del ensayo se han tenido en cuenta las limitaciones de la instalación de medida, tanto de los caudalímetros, como la línea del agua como el propio reactor

Los puntos de operación fueron seleccionados de un estudio previo con un motor real, de modo que estos ensayos han permitido independizar el comportamiento de las diferentes especies químicas frente a la temperatura, gasto y humedad entre otras variables y de este modo completar la caracterización todo ello en unas condiciones de operación factibles en un motor actual.

Reactor

Las dimensiones del monolito ensayado son las siguientes (*Ver Tabla 2*)

Geometría EATS	
Cell density [cpsi]	400
w [m]	0.00023
D [m]	0.04245
L [m]	0.0932

Tabla 2. Geometría monolito

Donde el diámetro (D) es de 42.45 mm, la longitud total es 93.2 mm, el espesor de pared es 0.23 mm y la densidad de celda por pulgada cuadrada es de 400. Estos datos han sido constantes a lo largo del ensayo de modo de que el volumen del TWC es conocido y se mantiene constante durante la campaña, la relación entre dicho volumen y el gasto volumétrico del flujo de gases adquiere una gran importancia ya que marcará el tiempo de residencia de las reacciones que se dan dentro del reactor, a la inversa de este tiempo de residencia se le conoce como *space velocity* y relaciona el volumen del reactor y el gasto volumétrico de la siguiente manera:

$$SV = \frac{\dot{V}}{V(\text{TWC})} = \frac{1}{\tau}$$

En el caso de los ensayos para caracterizar el TWC se optó por ensayar con un *space velocity* de 15000 h⁻¹ con el objetivo de trabajar dentro de un rango aceptable de

gastos, para evitar la saturación de los caudalímetros y que nos permita distinguir correctamente las tendencias de las diferentes especies al reaccionar entre sí.

Comportamiento térmico

En cuanto a las condiciones térmicas de trabajo como bien se puede intuir se tuvo que idear un método para aislar térmicamente las partes de la instalación que estuvieran en contacto con el aire ambiente, concretamente la parte del reactor, que se encontraba tras el horno, debía preservar las condiciones térmicas impuestas aguas arriba y la línea que conectaba el mezclador y el horno también, y así evitar pérdidas de calor sobre todo por radiación.

Para ello se recubrió la línea situada entre mezclador y horno con una capa de espuma aislante y sobre esta se dispuso otra capa de papel de aluminio para completar el recubrimiento aislante, el objetivo es que esta zona se preserven los 200°C - 250°C impuesto para evitar cambios de estado o inestabilidades en la mezcla gaseosa. Por

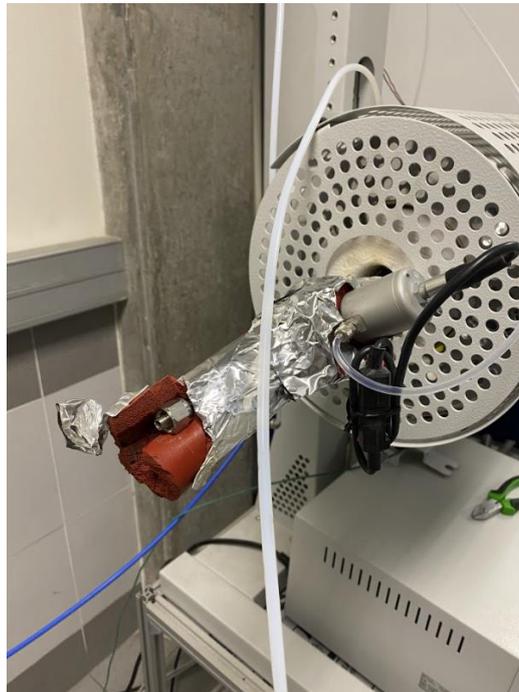


Figura 17. Aislamiento línea mezclador-horno

otra parte, la línea que se encuentra aguas abajo del horno, debe soportar condiciones térmica más exigentes, próximas a los 800°C , de modo que se ha optado por un aislamiento formado por dos capas de recubrimiento cerámico y por encima una última capa de papel de aluminio.

Verificación de los puntos de medida

Para verificar el montaje se usaron mezclas de aire con 1000 ppm de CO_2 , con el objetivo de verificar las medidas aguas arriba y aguas abajo del reactor, para ello también realizaron medidas a distintas *space velocities* con el objetivo de analizar la fiabilidad de la instalación de cara a futuros ensayos.

4.2 Metodología experimental

Los ensayos habitualmente se inician seleccionando uno de los puntos de operación de la *Tabla 3*, directamente seleccionados de los ensayos de la campaña previa.

λ	CO	CO ₂	CH ₄	C ₃ H ₆	C ₃ H ₈	N ₂	NO	O ₂
(-)	ppm	F_molar	ppm	ppm	ppm	F_molar	ppm	F_molar
0.95	12847.57	0.105	54.76	167.97	189.46	0.893	2110.48	0
0.975	8980.37	0.106	46.51	166.78	172.96	0.892	2501.80	0.00002
0.99	6923.71	0.108	41.57	171.45	165.66	0.889	2702.96	0.00184
0.995	6294.20	0.107	40.12	171.80	157.03	0.889	2768.75	0.00243
0.9975	5645.20	0.108	39.47	171.87	159.79	0.889	2835.99	0.00257
1	5214.75	0.109	37.78	169.74	156.03	0.888	2871.18	0.00279
1.0025	4966.83	0.108	36.73	164.43	145.21	0.888	2893.98	0.00306
1.005	4759.60	0.109	36.86	176.83	148.78	0.887	2918.92	0.00350
1.01	4209.08	0.109	36.92	168.79	150.73	0.886	2975.98	0.00412
1.025	2911.83	0.108	31.74	178.52	146.22	0.885	3132.33	0.00622
1.05	1456.97	0.108	26.94	167.46	134.99	0.881	3302.12	0.00982

Tabla 3. Puntos operados en el banco

Una vez decidido el dosado que se pretende ensayar se pasa a la siguiente hoja de Excel, desarrollada con el objetivo de obtener los gastos volumétricos que se impondrán posteriormente en el mezclador a partir de una serie de conversiones teniendo en cuenta el gasto másico del flujo, las dimensiones del monolito, *space velocity* y las características de cada una de las especies que serán introducidas en el ensayo, todo ello aparece detallado en las *figuras 18, 19 y 20*.

DATOS A INTRODUCIR POR EL USUARIO			
Gasto másico entrante G (kg/h)		Composición del gas	
	5,132863368	en ppm molar	en fracción molar
Condiciones de operación		CO	corrección FTIR
T (°C)	20	5215	0,005315386
P (Pa)	101325	CO ₂	0,10884
Geometría EATS		CH ₄	36,28999999
Cell density [cpsi]	400	C ₃ H ₆	130,8999998
w [m]	0,00023	C ₃ H ₈	149,5415999
D [m]	0,04245	H ₂	0
L [m]	0,0932	N ₂	0,879805
		NO	2860
		NO ₂	0
		NH ₃	0
		H ₂ O	0
		SO ₂	0
		O ₂	0,002916
Condición de comprobación			
Tiempo residencia	0,07927302	s	
Tiempo de residencia	2,2222E-05	h	
SV	45000	h ⁻¹	

Figura 18. Hoja Excel para obtención datos del SCADA (1)

DATOS A INTRODUCIR AL PROGRAMA SCAPA			
Especia injectada	Gasto por especie Gx (kg/h)	Caudal normalizado Qnx (m3n/h)	Caudal normalizado Qnx (ln/h)
CO	0,0257	0,0220	22,0411
CO2	0,8190	0,4477	447,6725
CH4	0,0001	0,0002	0,1505
C3H6	0,0009	0,0005	0,5428
C3H8	0,0011	0,0006	0,6201
H2	0,0000	0,0000	0,0000
N2	4,2326	3,6345	3634,5124
NO 50%/N2 50%	0,0331	0,0275	27,4738
NO2 5%/N2 95%	0,0000	0,0000	0,0000
NH3	0,0000	0,0000	0,0000
H2O	0,0000	0,0000	0,0000
SO2	0,0000	0,0000	0,0000
O2	0,0161	0,0134	13,4113
	5,1287	4,1464	4146,4244
		4,143287208	4143,287208
			69,10707383

Figura 19. Hoja Excel para obtención datos del SCADA (2)

Pesos moleculares (g/mol)			Cte universal	Densidad de cada especie	Densidad de cada especie
			de cada especie	en condiciones normales	en condiciones de operaci
			Rgx (Pa.m3/kg/K)	ρnx (kg/m3)	ρnx (kg/m3)
Monóxido de carbono	CO	28,0101	296,8384	1,1644	1,1644
Dióxido de carbono	CO2	44,0095	188,9245	1,8295	1,8295
Metano	CH4	16,0425	518,2778	0,6669	0,6669
Propileno	C3H6	42,0797	197,5887	1,7493	1,7493
Propano	C3H8	44,0956	188,5556	1,8331	1,8331
Hidrógeno	H2	2,01588	4124,4876	0,0838	0,0838
Nitrógeno	N2	28,0134	296,8034	1,1645	1,1645
Óxido nítrico	NO	30,0061	277,0927	1,2474	1,2474
Dióxido de nitrógeno	NO2	46,0055	180,7278	1,9125	1,9125
Amoníaco	NH3	17,03052	488,2101	0,7080	0,7080
Agua	H2O	18,01528	461,5233	0,7489	0,7489
Dióxido de azufre	SO2	64,0638	129,7842	2,6632	2,6632
Oxígeno	O2	31,9988	259,8370	1,3302	1,3302
Aire	N2 (79%) O2 (21%)	28,850334	288,1933	1,1993	1,1993
NO 50%/N2 50%				1,2066	1,2066
NO2 5%/N2 95%				1,2026	1,2026
GAS	PMGAS	29,7761641		1,237829383	

Figura 20. Hoja Excel para obtención datos del SCADA (3)

Tras obtener los valores que se deben imponer en el mezclador, se emplea el software Scada para iniciar la formación de la mezcla, sin embargo, antes de empezar el ensayo

se debe verificar que las concentraciones deseadas son las que llegan a reactor para ello se emplea la línea del bypass, ya que durante este proceso el horno no es necesario. Durante el procedimiento la evolución de las concentraciones será monitorizada empleando el FTIR, dado que este equipo es el que proporciona información en tiempo real de como progresa el ensayo.

4.3 Software

Puesta a punto y encendido del FTIR

La secuencia que se debe seguir para el encendido y la puesta a punto del FTIR es la que se describe a continuación:

1. En primer lugar, se purga con nitrógeno el equipo para evitar la presencia de impurezas de ensayos anteriores, para ello se conecta la línea de N₂ al equipo y se hace deja media hora.
2. Verificar que las conexiones de la parte trasera son las correctas.
3. Encender el interruptor del equipo
4. Verificar que las temperaturas requeridas por los indicadores sean de 191°C en ambos casos.
5. Abrir la válvula de alimentación del nitrógeno con una presión de 1 a 1.4 bar.
6. Ajustar los caudalímetros del equipo, mostrados para que el gasto sea superior a 0.2 l/min.
7. Esperar a que el equipo se caliente, aproximadamente media hora.
8. Introducir entre 400 y 600 ml de nitrógeno líquido en la entrada correspondiente.
9. Abrir el software MG-2000 y esperar hasta que cargue la página principal del programa mostrada en la *figura 21*. [5]

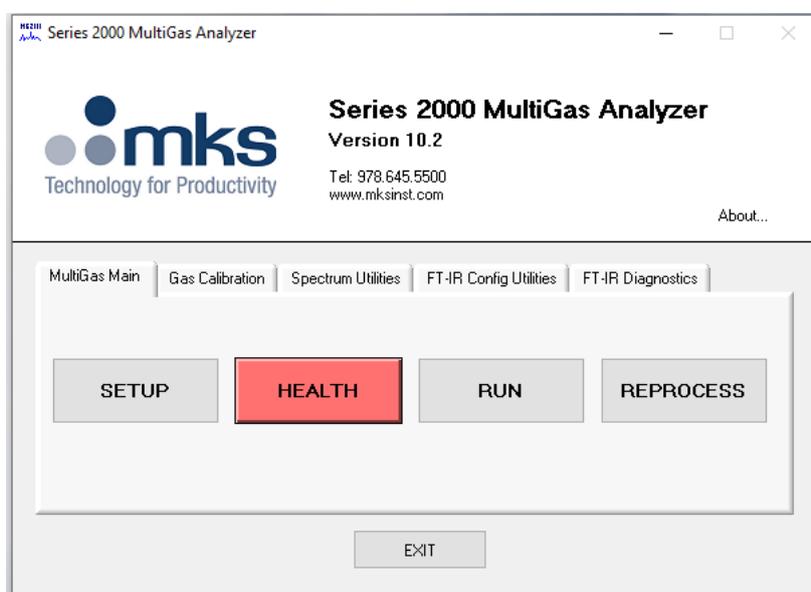


Figura 21. Panel inicial MG2000

10. Cuando la temperatura del equipo alcance los 191°C, darle a la opción “set up”, seleccionar el tipo de mezcla en “load” y deseleccionar la opción de almacenamiento de datos, además también se debe seleccionar el “reporting Interval” que es el intervalo de tiempo entre cada medida mostrada, se selecciona la opción “run” con todo ello se puede iniciar el “New Background” para que el equipo almacene los datos de referencia. Conviene esperar al menos 10 segundos antes de darle a iniciar el background, para finalizar volver a la pantalla principal haciendo clic en “return”.

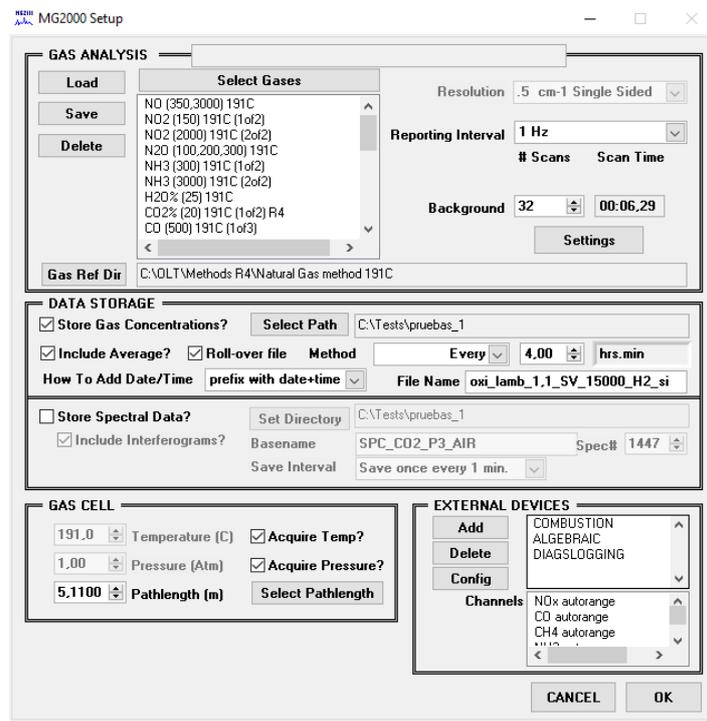


Figura 22. MG2000 Setup

11. Seleccionar “health” para observar el estado de los parámetros de funcionamiento del equipo, de esta forma el software mostrará una secuencia de pasos si se cumplen las condiciones todo estará en verde y bastará con darle a “next”.

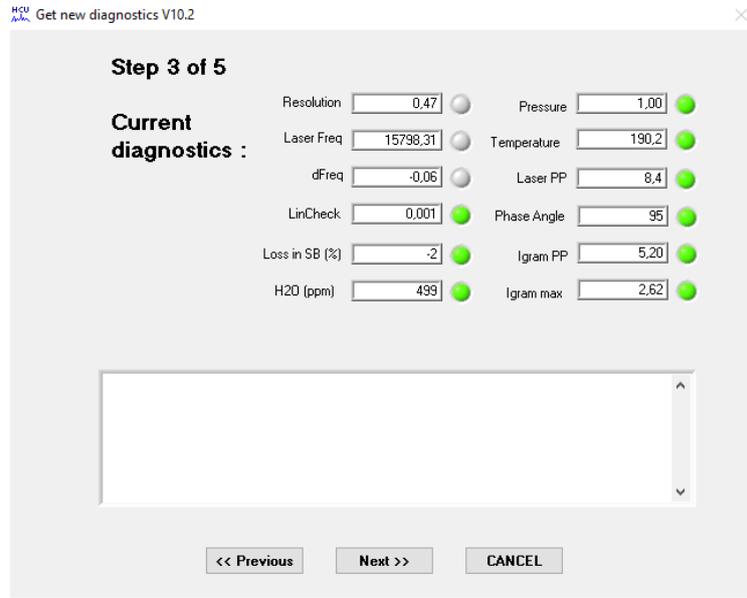


Figura 23. New diagnostic setup step 2

12. En caso contrario se debe volver a realizar un nuevo background, como dato orientativo uno de los parámetros que más dificulta este procedimiento es la concentración de H₂O que debe ser igual o ligeramente inferior a 500 ppm, para ello se debe aumentar el flujo de nitrógeno, pero si este aumento es excesivo se enfría la mezcla por lo que no se cumple el requisito de que la temperatura sea a próxima a 191° C.



Figura 24. New diagnostic setup step 3

13. Para finalizar se debe llevar a cabo la prueba de ruido señal (SNR). Para ello, sin cerrar el recuadro de la *figura 25*, se selecciona la opción “FTIR diagnostics”.

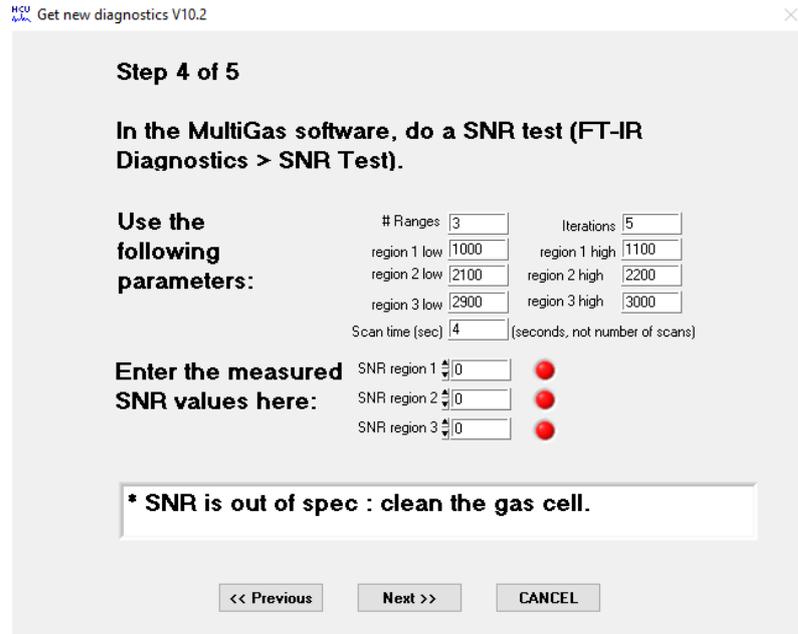


Figura 25. New diagnostic setup step 4

14. De entre las opciones disponibles en la *figura 26*, se seleccionará “Run SNR Test” que, de forma automática, realiza 5 iteraciones calculando la media entre las medidas.

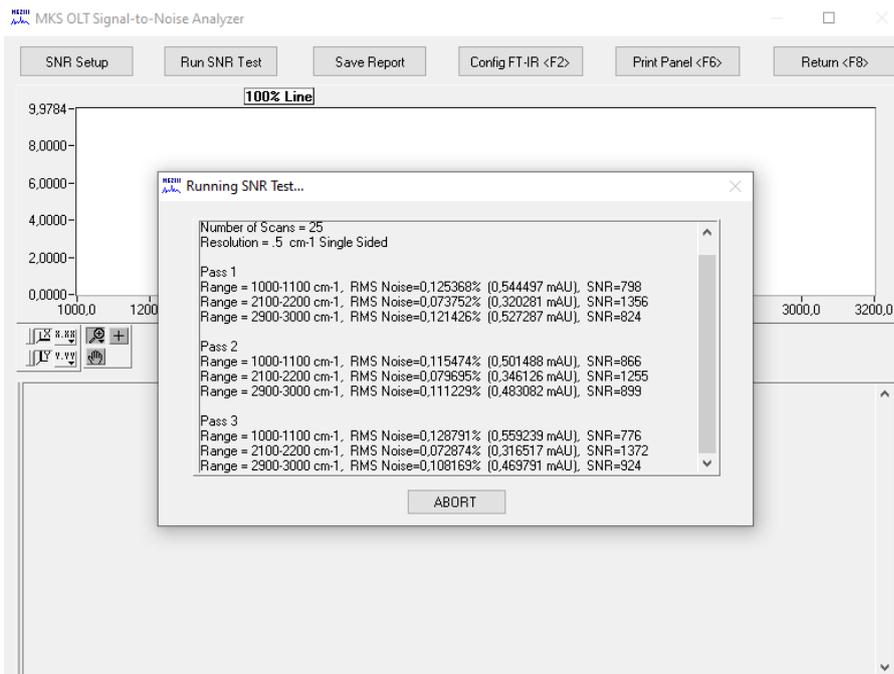


Figura 26. SNR MG2000 test

15. Finalmente se completan los recuadros correspondientes a las tres regiones de SNR en la ventana de la *figura 27*. y se hace clic en “Next”. Como comentario final cabe agregar que existe la posibilidad de evitar realizar el background, siempre y cuando se realice el ensayo el mismo día o las condiciones de operación sean similares a las del background empleado también llamado “Golden background”.

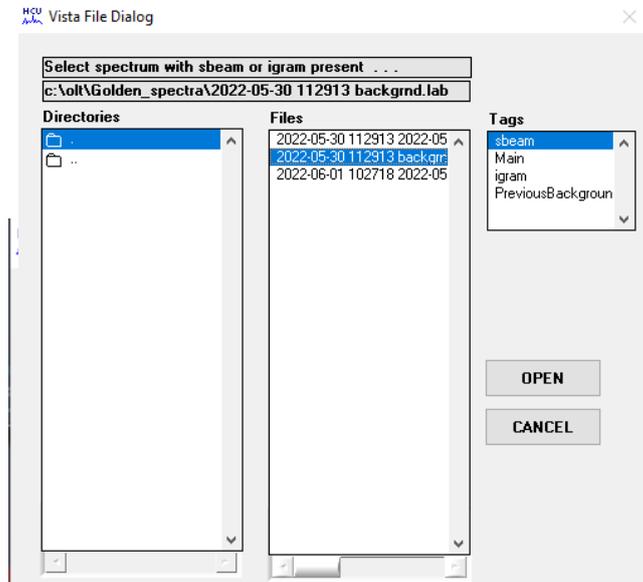


Figura 27. Background spectrum files

Para ello en la ventana “health” se accede a “more” para cargar el “Golden background” deseado, si se dan las condiciones y el background es válido la ventana tendrá el aspecto de la *figura 28*. o con ambos recuadros de color verde.

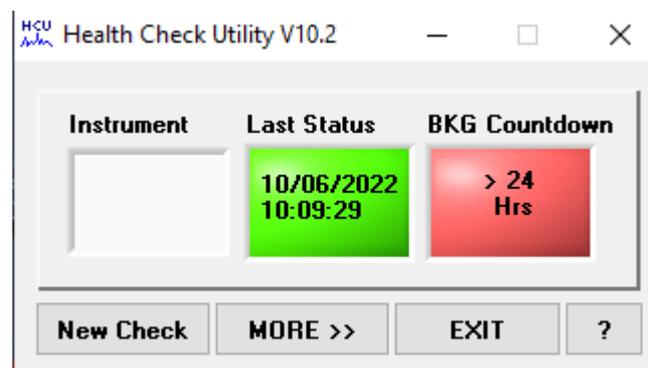


Figura 28. Health check utility

Posteriormente, para dar inicio al ensayo se activa el cromatógrafo en los ensayos en los que hay hidrógeno, y además se enciende el horno y se impone el gradiente térmico en este caso 10 °C/min y la temperatura máxima.

Procedimiento de medida del cromatógrafo

Para llevar a cabo el proceso de medida de las concentraciones de H₂ en los ensayos en los que esté presente se procede de la siguiente manera:

1. Abrir el acceso directo a la página 990 Micro GC PROstation

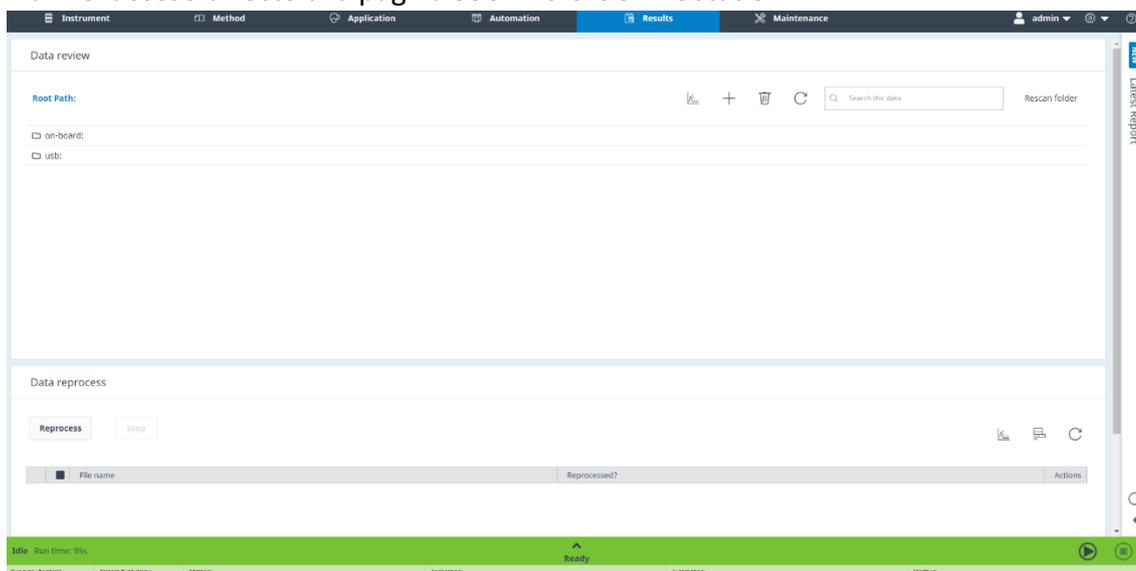


Figura 29. Pantalla inicial de 990 Micro GC PROstation

- Acceder a la opción “Method” situada en la parte superior de la *figura 20*. para cargar el método predeterminado con el que se van a llevar a cabo las medidas, con esto el equipo queda identifica la calibración necesaria para el ensayo que el usuario pretende hacer, en este caso ya está guardado el archivo “TWC” como se puede apreciar en la *figura 30*.

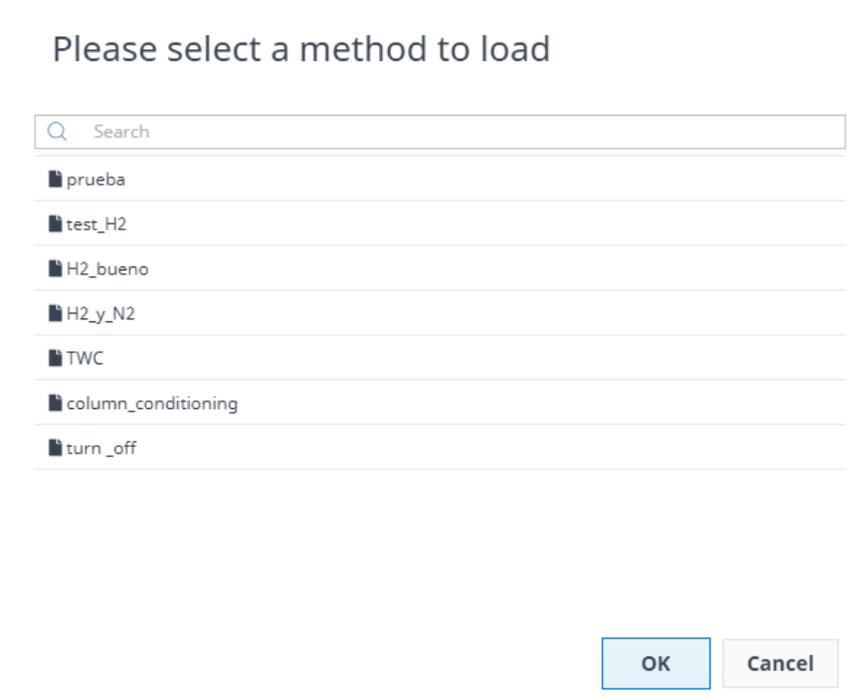


Figura 30. Panel de selección de método del cromatógrafo

- Tras elegir el método este se debe cargar en el PC seleccionando la opción marcada en la *figura 31*.

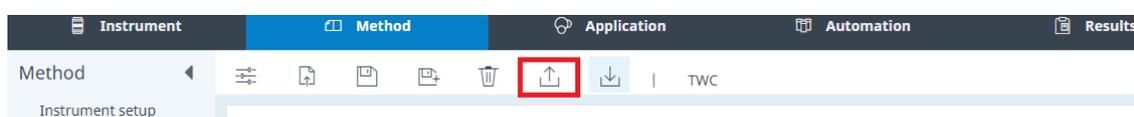


Figura 31. Icono para cargar método al PC

- Espera unos 95s para que el método seleccionado se cargue en el PC
- Una vez cargado el método en el ordenador, la información debe trasladarse al equipo de medida, para ello seleccionar la opción de la *figura 31*.

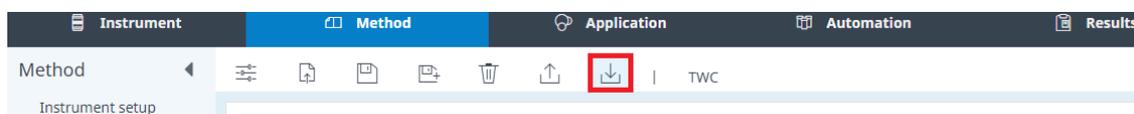
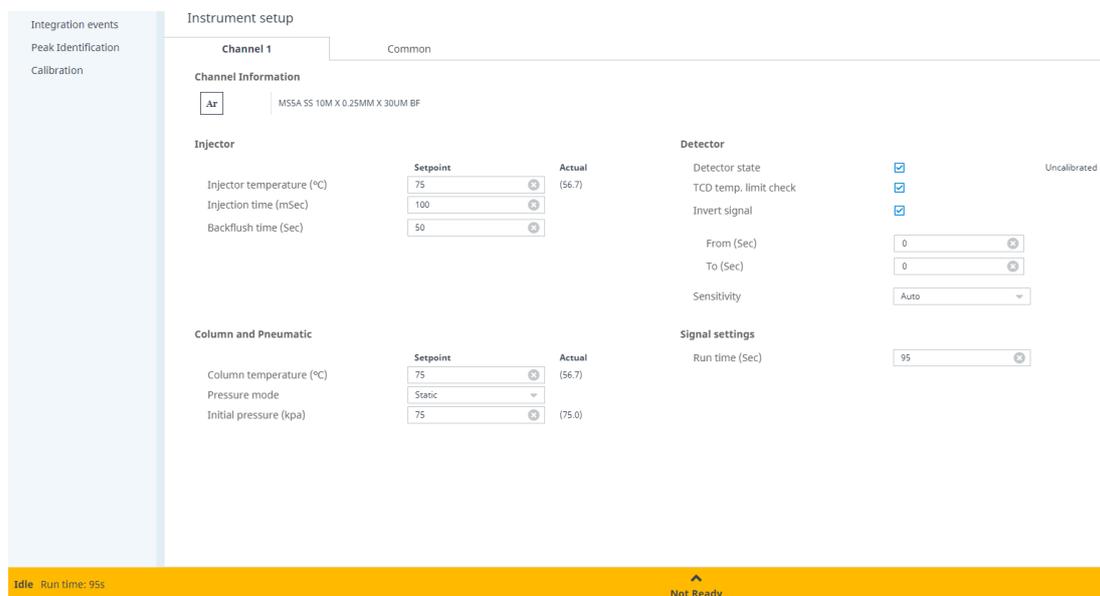


Figura 32. Icono para cargar método al equipo

6. Una vez elegido el método con el que el cromatógrafo va a llevar a cabo los cálculos, será necesario introducir las condiciones de medida, en este caso se han mantenido las que aparecen en la *figura 33*. al realizar los ensayos con hidrógeno



The screenshot shows the 'Instrument setup' window for 'Channel 1'. The interface is divided into several sections:

- Channel Information:** Shows 'Ar' as the gas and 'MSSA S5 10M X 0.25MM X 30UM BF' as the column.
- Injector:**
 - Injector temperature (°C): Setpoint 75, Actual (56.7)
 - Injection time (mSec): 100
 - Backflush time (Sec): 50
- Column and Pneumatic:**
 - Column temperature (°C): Setpoint 75, Actual (56.7)
 - Pressure mode: Static
 - Initial pressure (kpa): 75, Actual (75.0)
- Detector:**
 - Detector state: (Uncalibrated)
 - TCD temp. limit check:
 - Invert signal:
 - From (Sec): 0
 - To (Sec): 0
 - Sensitivity: Auto
- Signal settings:**
 - Run time (Sec): 95

At the bottom, a yellow bar indicates 'Idle Run time: 95s' and 'Not Ready'.

Figura 33. Condiciones de medida en el equipo

7. Una vez se ha finalizado el ensayo se pasa al acondicionamiento de la columna para eliminar las posibles trazas de agua seleccionando la opción “column conditioning” en el panel de selección del método (*Ver figura 30.*)

También es importante registrar los valores de oxígeno a lo largo del ensayo, como el FTIR no proporciona la evolución de esta especie, se activa la pantalla de O₂ en la sonda lambda para supervisar su desarrollo a lo largo de del proceso.

Para finalizar, es importante no olvidar activar el testigo de la resistencia del horno y empezar a guardar los datos una vez alcanzados los 100 °C en el horno, esto es porque por debajo de dicha temperatura no se registra actividad química alguna.

Al acabar de medir se procede a acondicionar el cromatógrafo (sección 5.4) y en unos 20 minutos este equipo ya estará enfriado de modo que se podrá apagar. Respecto al horno se elimina la rampa de temperatura, se selecciona como temperatura final 0 °C y se apagan las resistencias.

En cuanto al FTIR el procedimiento consiste en dejar en funcionamiento las especies mayoritarias y parar el resto de los caudalímetros, reduciendo su valor a 0 l/h en Scada y cerrando las válvulas en el mezclador. Para acabar se reduce el gasto del caudalímetro de N₂ a 0 l/h y se eleva el de aire a un valor próximo a los 2000 l/h, se cambian las botellas de N₂ y aire sintético cerrando brevemente la válvula de aire al



realizar el cambio. Este equipo estará en este estado aproximadamente 1 hora y 30 minutos antes de ser apagado.



5. Discusión de resultados

5.1 Actividades previas

Como bien se ha descrito en la sección 4.1 antes de iniciar los ensayos se llevaron a cabo una serie de experimentos previos en la instalación con el objetivo de comprender mejor el funcionamiento de esta y verificar que las medidas no fueran alteradas durante todo el procedimiento, obteniéndose los siguientes resultados.

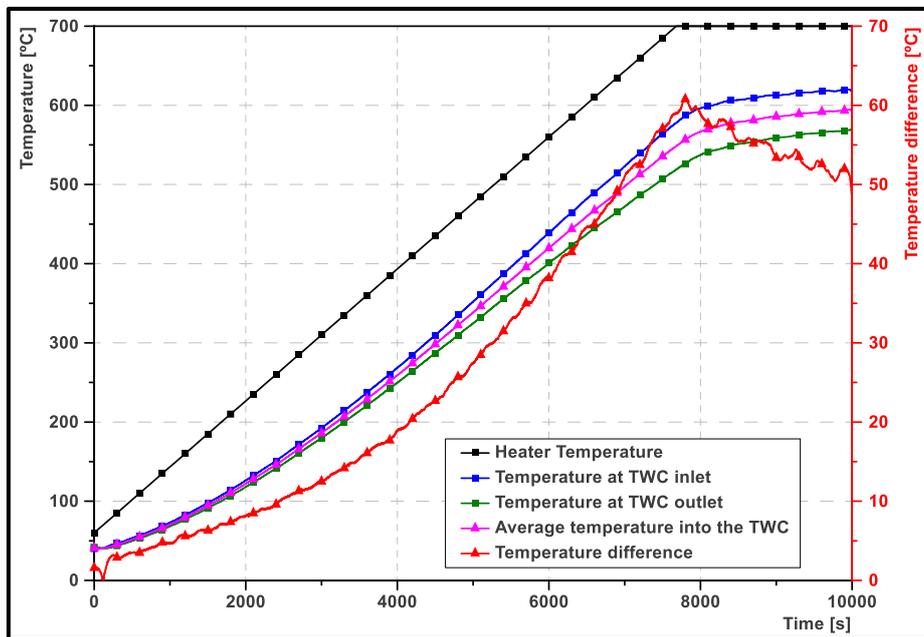


Figura 34. Comportamiento térmico de las temperaturas



Figura 35. Montaje final del aislamiento térmico

En este primer experimento, se introdujo únicamente aire y se procedió a calentarlo con el horno eléctrico, con ello se buscaba comprender mejor el comportamiento térmico del sistema con el nuevo aislamiento, de modo que se obtuvo como resultado la rampa térmica mostrada en la *figura 34*.

Inicialmente el sistema mostró pérdidas de hasta 85 °C entre entrada y salida del catalizador. Tras recortar el segmento de la campana donde se encontraba el reactor y aplicar las capas de aislamiento en las zonas previamente mencionadas el sistema, como se puede ver en la *figura 35*., se detectaron pérdidas de hasta 60 °C durante la rampa térmica y una vez se dejaba estabilizar la mezcla durante 50 minutos las pérdidas estaban entorno a los 50 °C. Dado que, las temperaturas durante el ensayo alcanzaban los 600 °C-700 °C las pérdidas eran menores del 10%, de forma que se estimó que el comportamiento era aproximado a un proceso adiabático lo cual era un requisito para los ensayos.

Otro de los comportamientos que se estudiaron antes de realizar los ensayos fue la repetitividad de las medidas, para ello se tomó como referencia la concentración de CO₂, introduciendo 1000 ppm en la instalación obteniéndose los resultados mostrados en la *figura 36*.

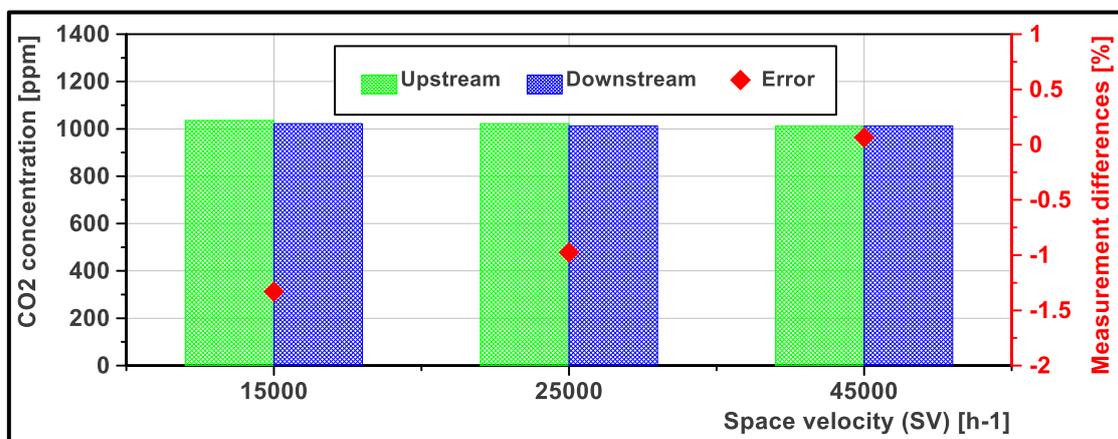


Figura 36. Medidas antes y después del TWC

Los resultados mostraron que el error entre las tendía a aumentar a medida que se reducía el *space velocity* seleccionado, sin embargo, debido a las limitaciones de los caudalímetros y dado que la diferencia era muy pequeña se decidió iniciar la campaña con SV de 15000 h⁻¹, sin descartar en un futuro variar este parámetro para estudiar su influencia en los resultados de forma independiente.

5.2 Curvas de Light-off

Estos fueron los resultados obtenidos tras el procesamiento de las señales obtenidas con el FTIR MKS 2030. Es importante puntualizar que el orden seguido será el expuesto en la *tabla 3.*, ya que ese fue el orden de realización de estos, en primer lugar, los ensayos con humedad relativa del 0%, posteriormente los de humedad relativa %5 y por último el caso de H₂ y humedad relativa al %5.

Ensayos Tipo I. (Humedad relativa 0%)

λ	CO	CO ₂	CH ₄	C ₃ H ₆	C ₃ H ₈	N ₂	NO	O ₂
(-)	ppm	F_molar	ppm	ppm	ppm	F_molar	ppm	F_molar
~ 1	5214.75	0.109	37.78	169.74	156.03	0.888	2871.18	0.00279
0.995	6294.20	0.107	40.12	171.80	157.03	0.889	2768.75	0.00243
1.005	4759.60	0.109	36.86	176.83	148.78	0.887	2918.92	0.00350
0.975	8980.37	0.106	46.51	166.78	172.96	0.892	2501.80	0.00002
1.025	2911.83	0.108	31.74	178.52	146.22	0.885	3132.33	0.00622

Tabla 4. Composiciones ensayos tipo I

El primer ensayo realizado con humedad relativa nula buscó emular unas condiciones de operación estequiométricas, caso ampliamente estudiado en este tipo de sistemas y cuyo comportamiento es bien conocido a nivel teórico, ya que es el punto de operación óptimo par aun catalizador de tres vías, dado que no hay exceso ni falta de oxígeno al iniciar el proceso.

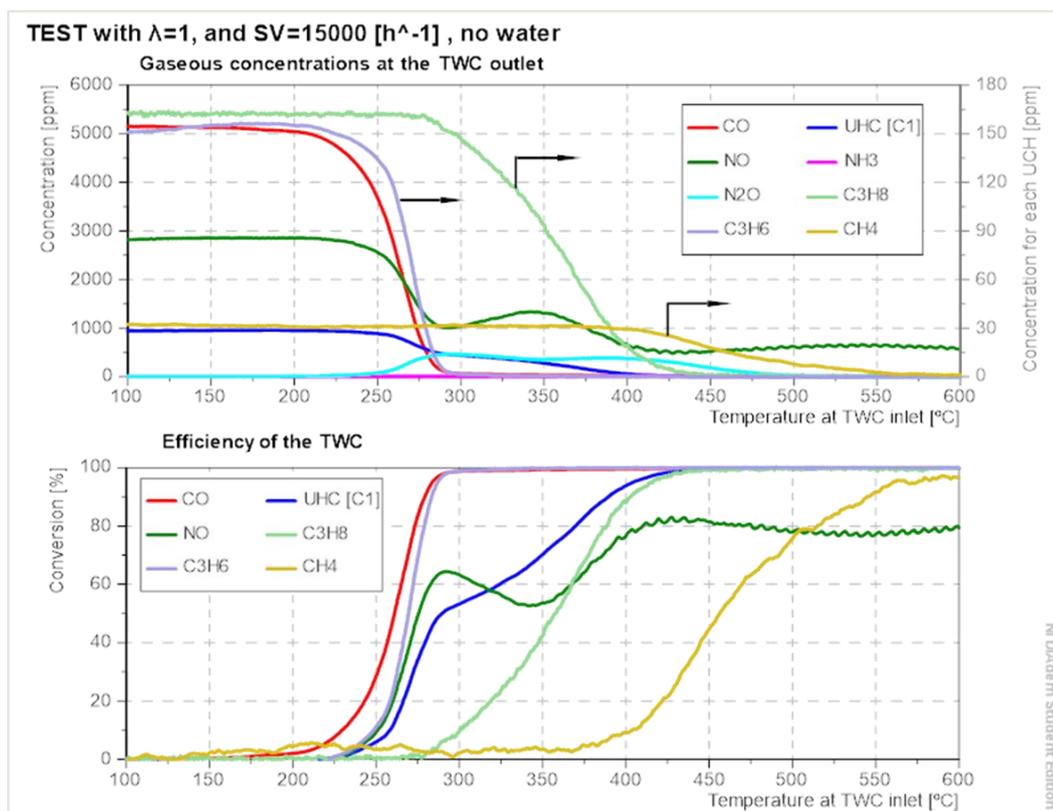
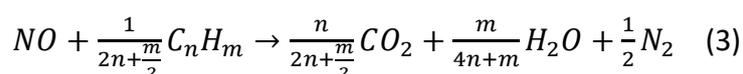
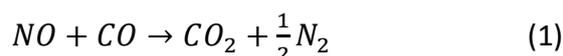


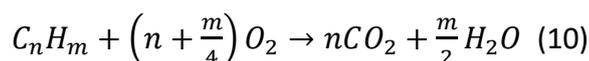
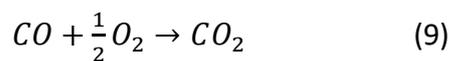
Figura 37. $\lambda=1$

En este ensayo, en concreto, se trata de un caso próximo a condiciones estequiométricas dado que, de ser condiciones estequiométricas todas las especies se consumirían al finalizar el experimento, sin embargo, no se da esa situación, como se puede ver en la *figura 37.*, al final del experimento todavía queda algo de especies reductoras (NO). A pesar de ello este punto de operación sirve para comprender como se comporta el sistema en condiciones muy próximas al óptimo teórico de un TWC.

En este caso a partir de los 250 °C el CO y el C₃H₆ reaccionan oxidándose con el NO hasta los 280 °C, tal y como dictan las reacciones (1) y (3) del mecanismo químico.

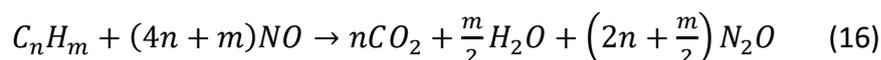


A partir de entonces ambas especies presentan una mayor selectividad a la hora de reaccionar con el O₂ dándose las reacciones (9) y (10).



Cuando se consume todo el oxígeno, se vuelve a dar un cambio de selectividad, de modo que el NO reduce el resto de UHC como se puede ver en el cambio de pendiente de la curva de NO.

Además, cabe mencionar que a partir de 250 °C, la reacción (16) también está sucediendo de manera simultánea dando como producto la generación de N₂O.



Finalmente, se consumen todos los HC pero, a partir de los 400 °C la eficiencia de conversión del NO no supera el 80%, presentando una temperatura de light-off de 262 °C . Lo que indica claramente que el λ no es uno si no ligeramente pobre.

El segundo ensayo se llevó a cabo en unas condiciones ligeramente ricas, es decir, con un pequeño 'exceso' de combustible, esto conlleva que haya una mayor cantidad de especies reductoras (UHC y CO) y una menor cantidad de oxidantes (NO y O₂).

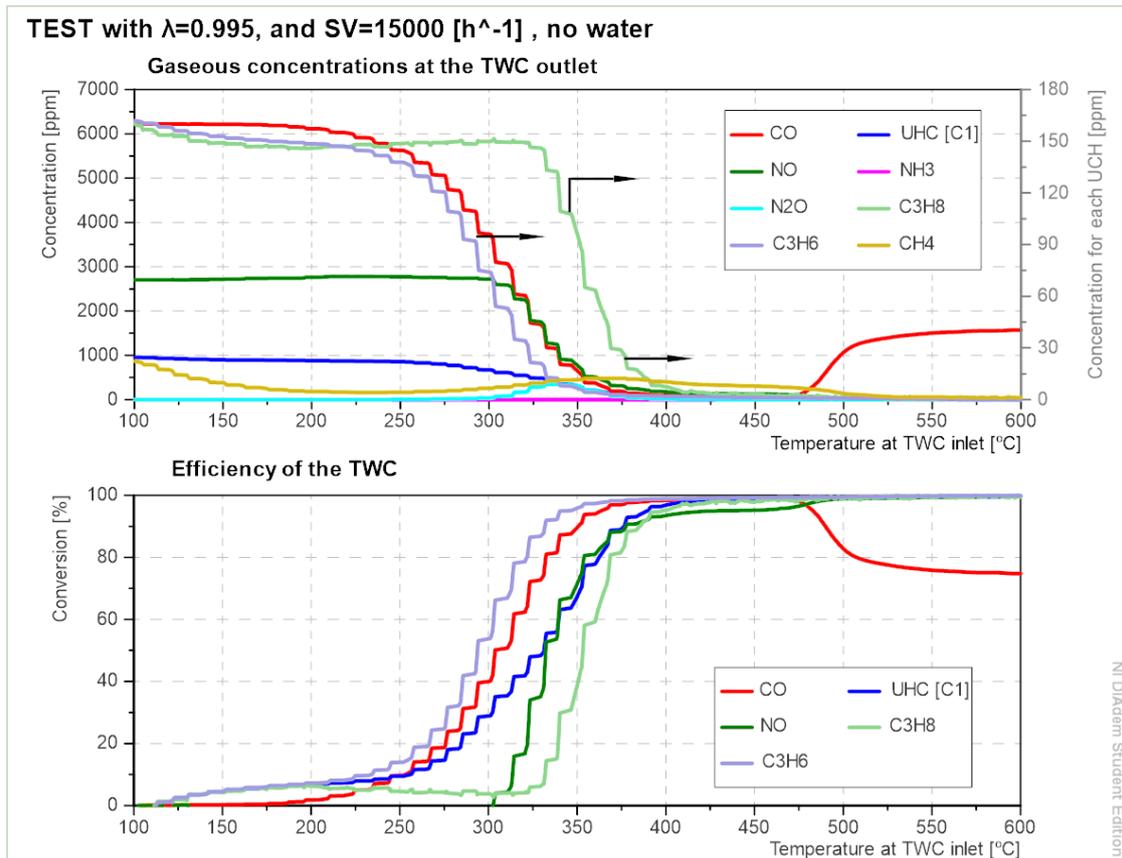


Figura 38. $\lambda=0.995$

Los resultados como se puede ver en la *figura 38*. permiten apreciar un gran cambio en la tendencia del CO, inicialmente se reduce como en el anterior ensayo pero al alcanzar temperaturas relativamente elevadas ($\sim 500^\circ\text{C}$) se observa un claro aumento de la concentración del monóxido de carbono así como una evidente reducción de su eficiencia, como consecuencia la temperatura de *light-off* aumenta a 309°C . Además, respecto el comportamiento del NO mejoró en comparación al primer ensayo como se puede vislumbrar en su curva de eficiencia de conversión.

Este resultado, no es sorprendente, ya que, teóricamente como se observaba en la *figura 38*., la tendencia es que en condiciones ligeramente ricas se reduzca mejor el NO y se oxide menos CO.

Debido a la elevada concentración de oxígeno, la oxidación de las especies con NO se da a temperaturas mucho más altas que en el caso anterior, de modo que en este caso la temperatura de *light-off* del NO registrada aumenta hasta los 324°C .

Como se observa en la *figura 38*. el CO y el C₃H₆ se consume a través de la oxidación con el O₂ entre 250°C y 300°C , a partir de esta temperatura se observa un cambio de la selectividad, de esta manera que, al comenzar a disminuir la concentración del

oxígeno, el NO, a través de las reacciones (1), (3) y (16), empieza a oxidar las especies reductoras.

La reducción final de la eficiencia de conversión del CO se debe a que la oxidación parcial del metano, según la reacción (11) del mecanismo provoca el aumento de la concentración de CO a elevadas temperaturas, y la ausencia de especies oxidantes en estas condiciones da como resultado la mencionada reducción en la eficiencia.

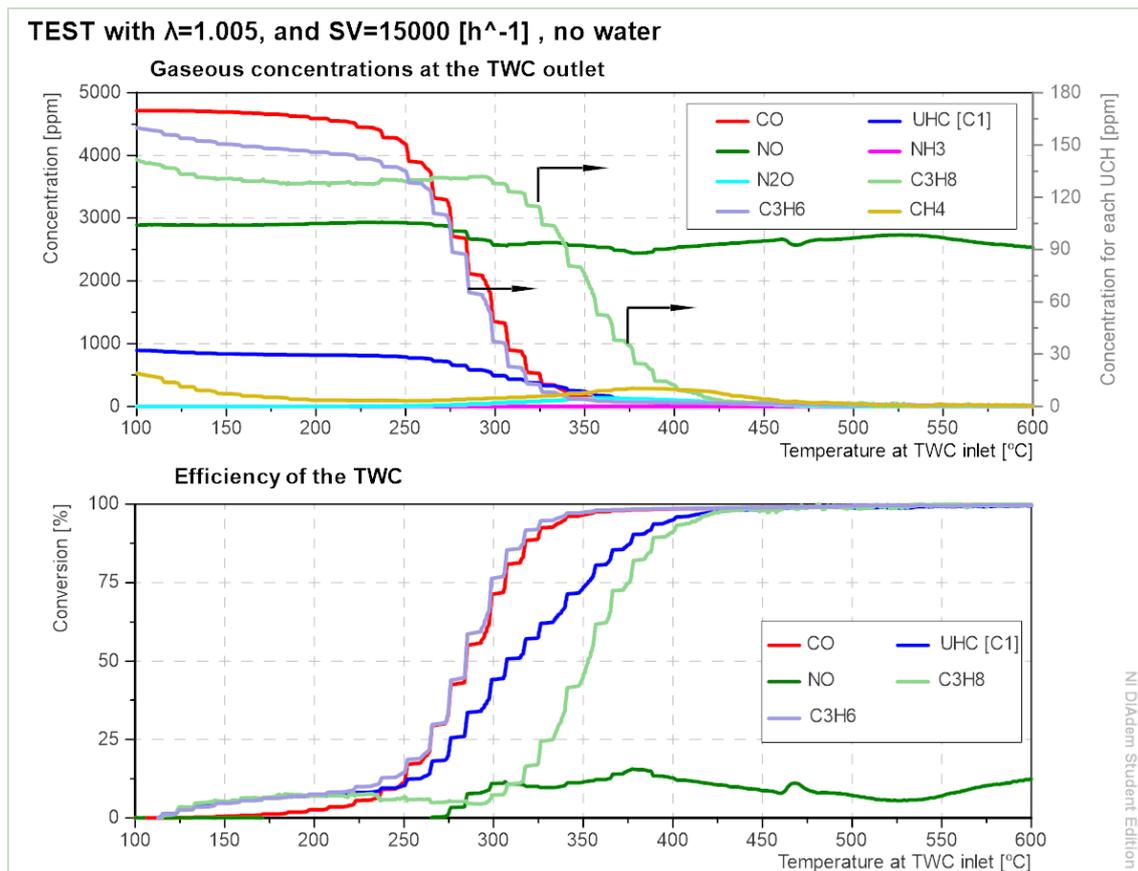
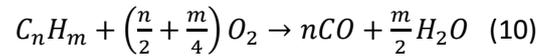


Figura 39. $\lambda=1.005$

En el tercer ensayo se procedió del mismo modo que en el segundo, pero las condiciones de operación fueron ligeramente pobres, por lo que se trabajaba con un exceso de oxígeno, o lo que es lo mismo una mayor concentración de especies oxidantes frente a las reductoras si lo comparamos con el primer ensayo. Debido a ello las tendencias se invierten si son comparados el segundo y el tercer ensayo.

La especie cuyo rendimiento baja drásticamente es el NO debido a la presencia de oxígeno hace que todas las especies tengan una mayor tendencia a oxidarse con él, de modo que el NO no llega a reaccionar con ninguna especie.

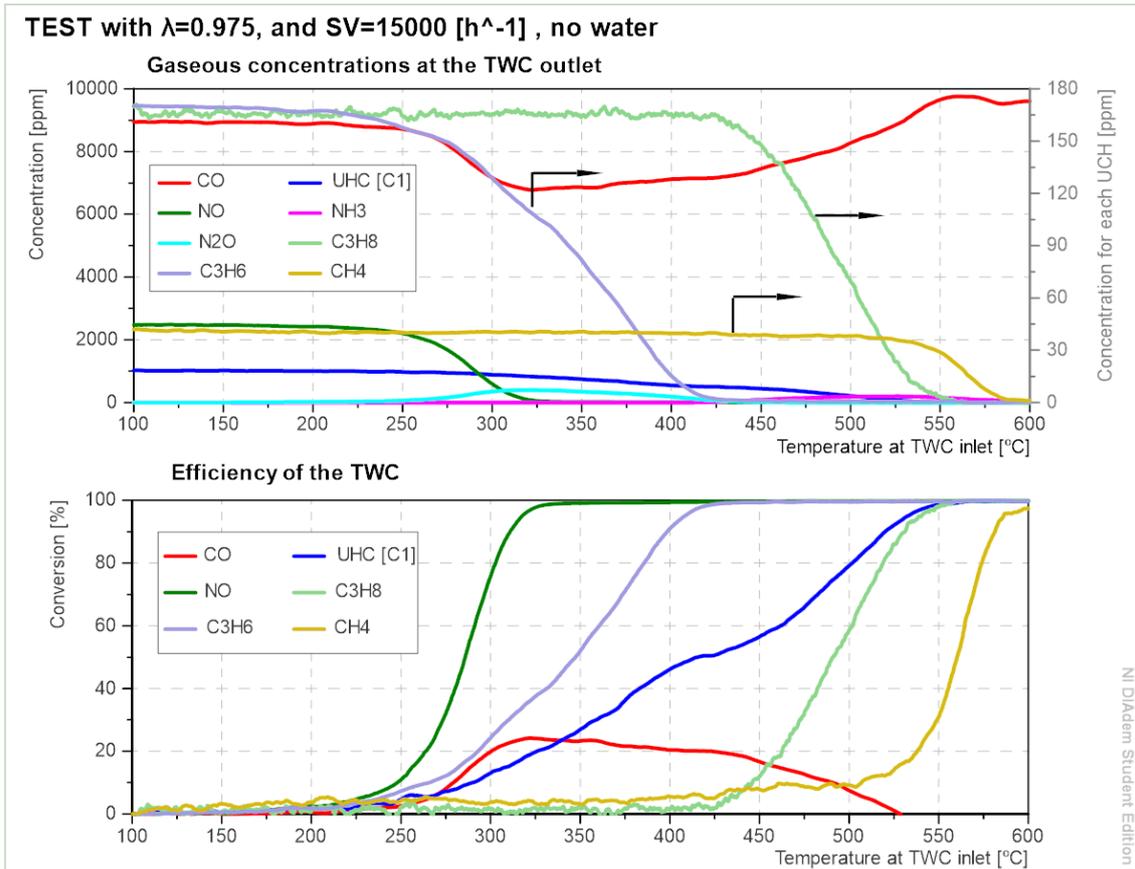
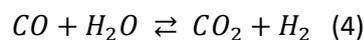


Figura 40. $\lambda=0.975$

El cuarto ensayo buscó verificar las tendencias observadas en el segundo, ensayando en este caso con una mezcla más rica, es decir con más especies reductoras que en el segundo. Ciertamente, se siguió viendo que el CO volvió a aumentar su concentración a temperaturas elevadas, reduciendo su eficiencia de conversión hasta valores por debajo del 20%, todo ello motivado por la oxidación parcial del metano

A partir de los 250°C el CO reacciona con el NO, a su vez en esta fase se puede observar el consumo de los hidrocarburos con el propio NO, todo ello debido a la baja concentración de oxígeno. Durante la reacción que involucra el consumo de los hidrocarburos se genera N_2O (16) como bien se puede observar en la propia figura 40.

Por su parte, la elevada presencia de CO, además de la formación de agua en la reacción (15), dan pie a que a partir de la reacción de water-gas shift se genere el H_2 suficiente para la formación de un poco de amoníaco.



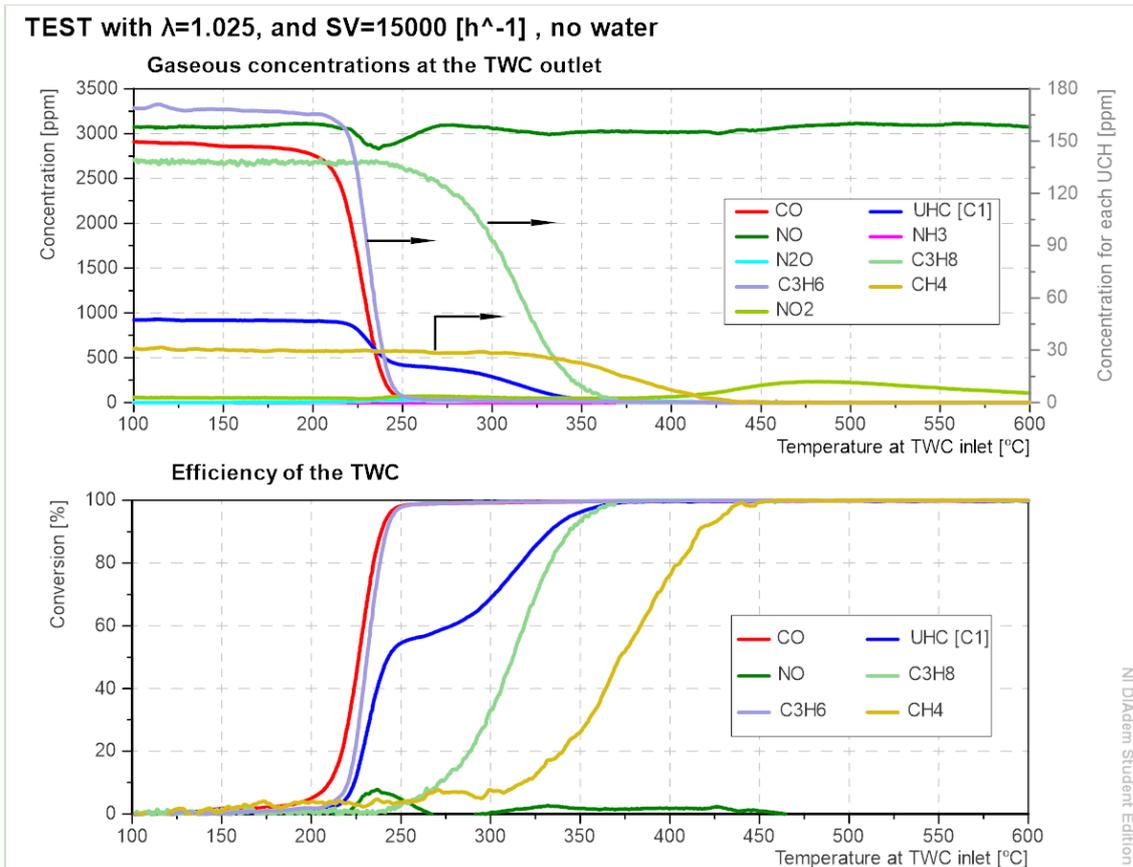
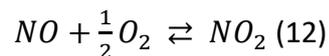


Figura 41. $\lambda=1.025$

El quinto ensayo buscaba emular las condiciones del tercero, pero en este caso el punto de operación elegido presentaba un dosado más pobre. Los resultados evidenciaron lo observado en el tercer ensayo con respecto al rendimiento de conversión del NO. En este caso la temperatura de light-off del CO disminuye considerablemente y se sitúa en los 247 °C.

Se trata del caso más pobre de la campaña de ensayos, la alta concentración de oxígeno provoca que la mayoría de las especies se oxiden con él, en el caso del NO se da la oxidación con oxígeno entre los 235°C y los 250°C dando como producto el NO₂.



Finalmente, como bien se sabe teóricamente la especie que apenas se consume en este caso será el NO.



Ensayos Tipo II. (Humedad relativa 5%)

λ	CO	CO2	CH4	C3H6	C3H8	N2	NO	O2	H2O
(-)	ppm	F_molar	ppm	ppm	ppm	F_molar	ppm	F_molar	F_molar
0.975	8980.37	0.106	46.51	166.78	172.96	0.892	2501.8	0.00002	0.05
0.995	6294.2	0.107	40.12	171.8	157.03	0.889	2768.75	0.00184	0.05

Tabla 5. Composiciones ensayos tipo II

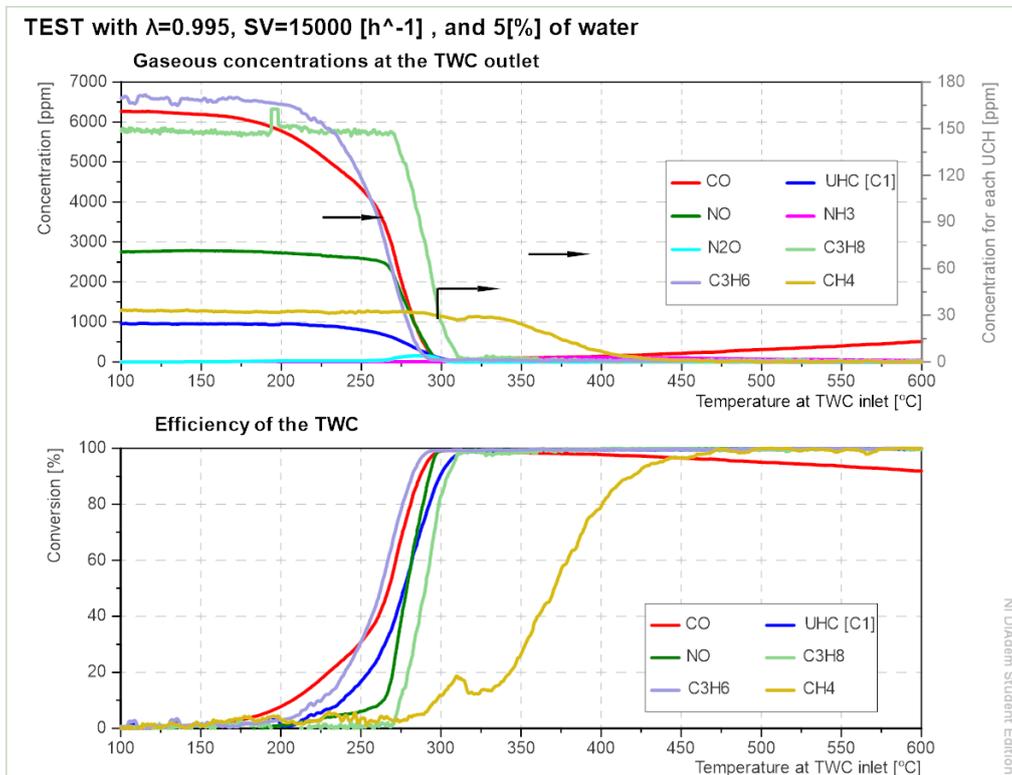


Figura 42. $\lambda=0.995$

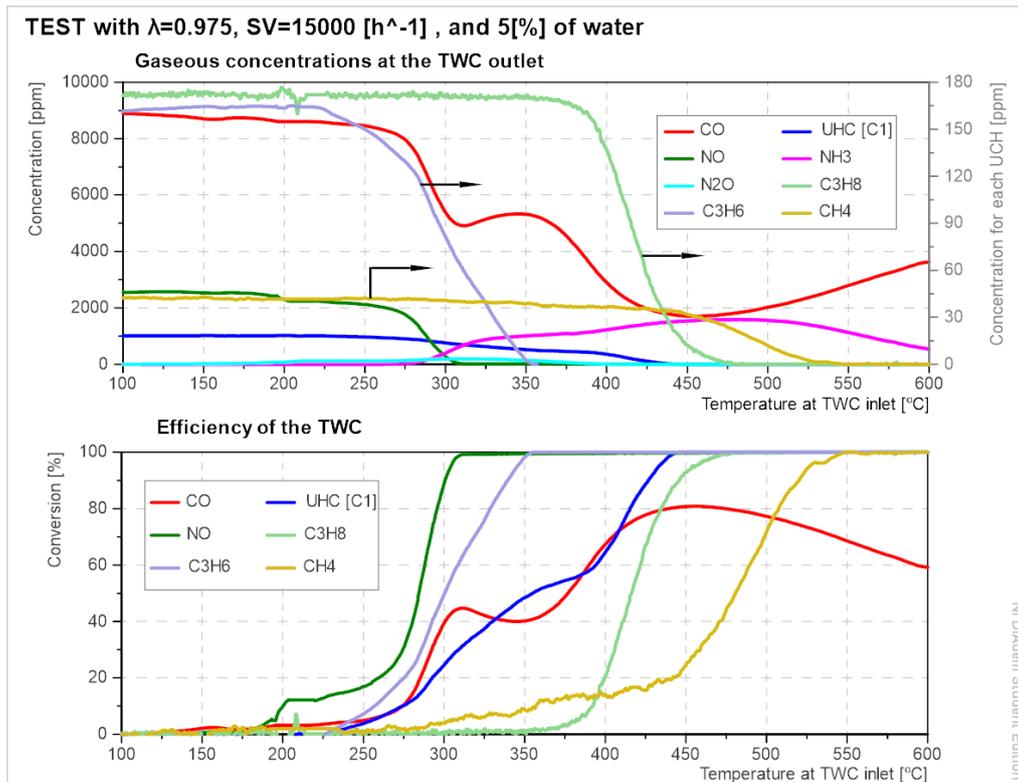
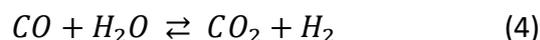


Figura 43. $\lambda=0.975$

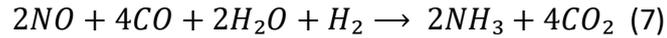
En estos ensayos se pretendía analizar cómo afecta la presencia de H₂O a los comportamientos vistos hasta el momento. El comportamiento de los UHC es similar a los ensayos tipo I, aunque es cierto que se desplaza hacia temperaturas de *light-off* ligeramente inferiores, en este caso T₅₀ se encuentra situada a unos 273 °C.

A pesar de lo mencionado, la gran diferencia se halla en la formación de NH₃ como consecuencia del comportamiento del CO y el NO al interactuar con el agua introducido.

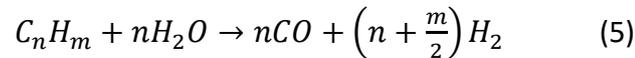
Por su parte, a partir de los 270 °C el NO, empieza actuando como oxidante conforme la reacción (15), dada la baja concentración de O₂, generando H₂O entre otros productos. Por otra parte, el CO reacciona con el agua conforme a la *water-shift reaction* (4):



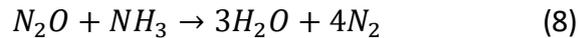
Dando como producto el hidrógeno necesario para que dada una cierta temperatura, en este caso a partir de los 270 °C, se genere NH₃ según la siguiente reacción:



Los hidrocarburos se empiezan a oxidar con el H₂O conforme a la steam reforming reaction (5) una vez el NO alcanza elevadas eficiencias (~300 °C):



Tras lo anteriormente expuesto, se puede observar cómo al consumirse el agua y la elevada eficiencia de conversión del NO, se da la reducción de la concentración de NH₃ registrado, que a su vez está reduciendo el N₂O formado en la reacción (16) a través de la oxidación de HC con el NO, esto lo hace siguiendo la reacción (8).



Como consecuencia se puede comprender que a partir de ese momento del ensayo la eficiencia de conversión del CO cayera por debajo del 80%, presentando una temperatura de *light-off* 350 °C, debido a la ausencia de especies oxidantes en esta fase del ensayo, este efecto es más acentuado a medida que aumentan las especies reductoras y disminuyen las oxidantes o lo que es lo mismo disminuye λ.

Por todo ello, se aprecia en las *figuras 42 Y 43*, que la temperatura de *light-off* es superior en el caso más rico, no solo del CO si no de todas las especies involucradas, siendo el CO el caso más destacable aumentando la T50 de este hasta unos 30 °C más en el caso más rico ensayado e estas condiciones.



Ensayos Tipo III. (Humedad relativa 5%+ H₂)

λ	CO	CO ₂	CH ₄	C ₃ H ₆	C ₃ H ₈	N ₂	NO	O ₂	H ₂ O	H ₂
(-)	ppm	F_molar	ppm	ppm	ppm	F_molar	ppm	F_molar	F_molar	ppm
0.975	8980.37	0.106	46.51	166.78	172.96	0.892	2501.8	0.00002	0.05	3339.5
0.995	6294.2	0.107	40.12	171.8	157.03	0.889	2768.75	0.00184	0.05	1294.3
1	5214.75	0.109	37.78	169.74	156.03	0.888	2871.18	0.00257	0.05	361.7

Tabla 6. Composiciones ensayos Tipo III

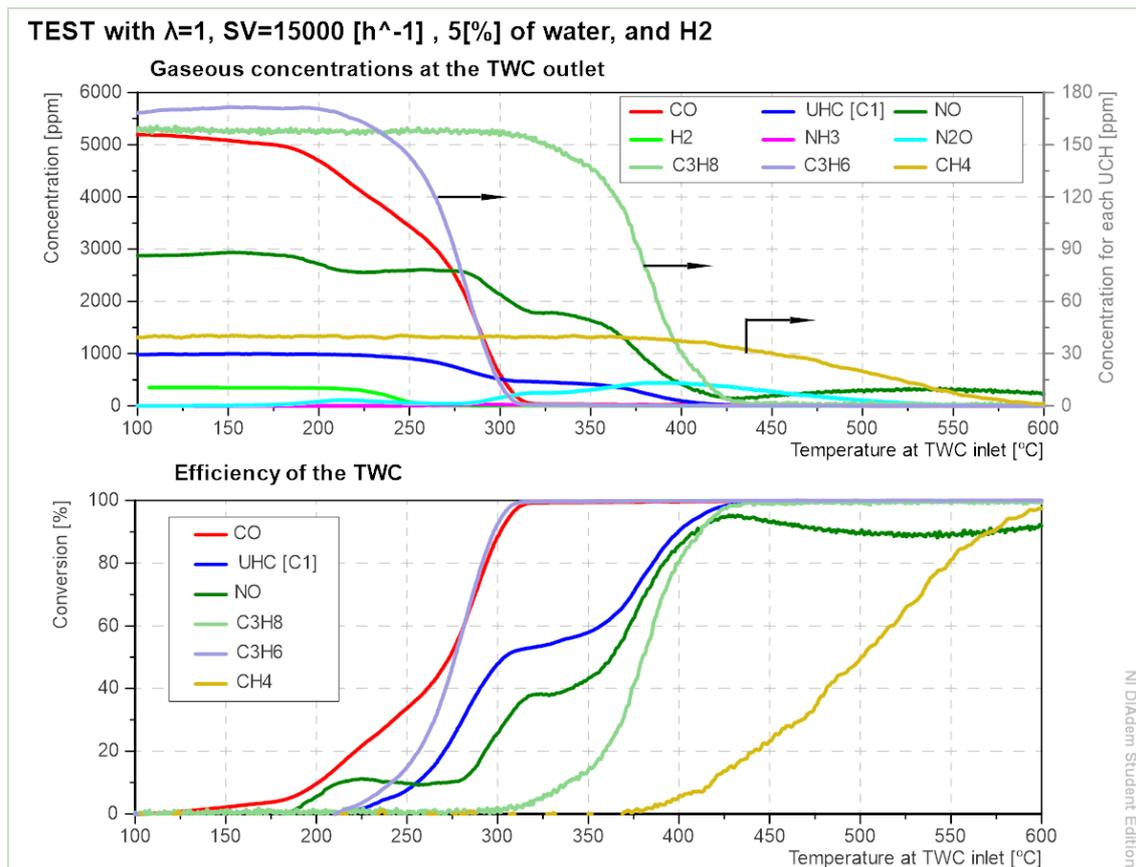


Figura 44. $\lambda \sim 1$

En el octavo ensayo se procedió a realizar el experimento en condiciones aproximadamente estequiométricas, pero incluyendo la presencia de H₂ y de humedad relativa.

Los resultados obtenidos resultaron ser muy similares a los obtenidos durante el primer ensayo en cuanto al desarrollo de las reacciones según el mecanismo químico empleado.

En primer lugar, las especies reductoras (CO y UHC) tienden a reaccionar por selectividad con el oxígeno, una vez se consume, empiezan a reaccionar con NO, reacciones (1) y (16). Debido a la presencia de agua e hidrógeno las reacciones de *water-shift* (4) y *steam reforming* (5) adquieren gran relevancia que en los ensayos de tipo II, y simultáneamente se dan las reacciones de formación de amoníaco.

Por su parte el NO, al oxidar los UHC, lo hace según la reacción (16) dando como resultado el aumento de la concentración de N₂O a partir de los 285 °C.

Respecto a las eficiencias de conversión de las especies involucradas se alcanzan a temperaturas superiores, lo que implica que las temperaturas de *light-off* aumentan.

Finalmente, cabe destacar que la concentración de hidrógeno se reduce rápidamente a partir de los 225 °C.

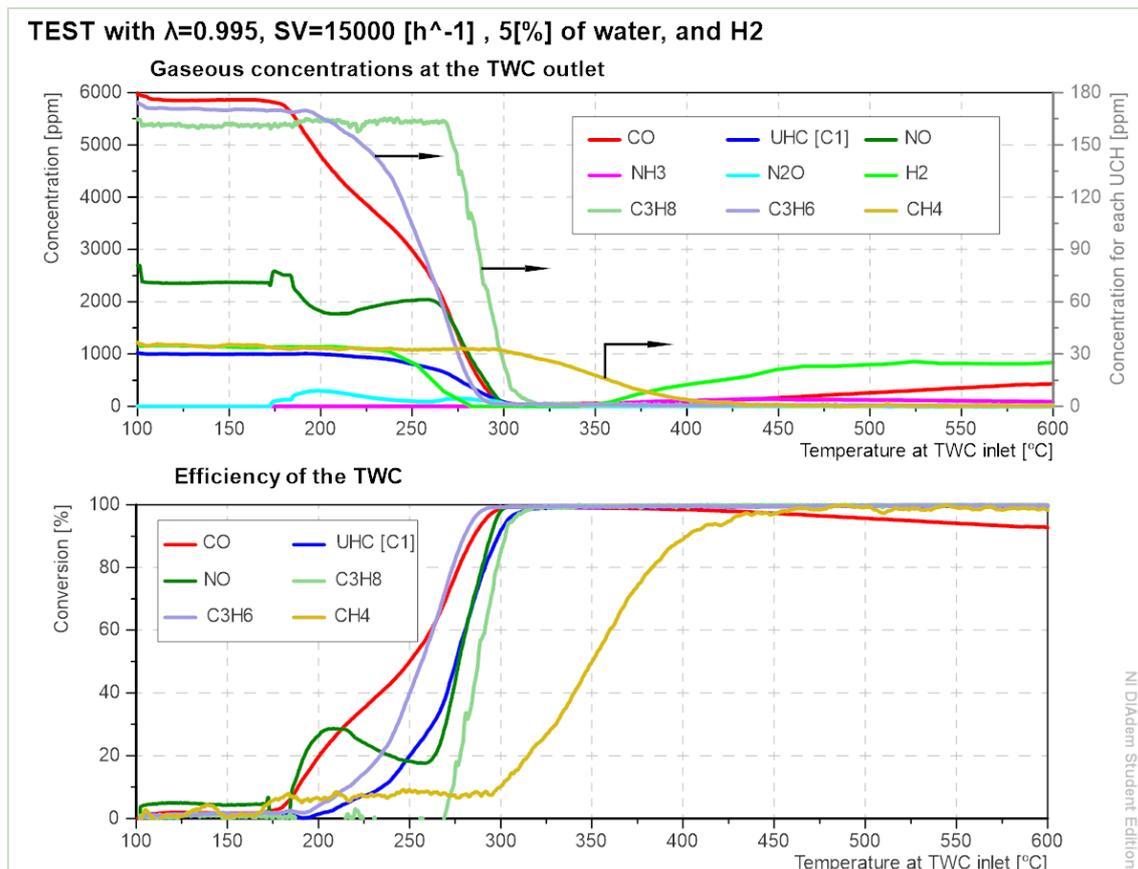


Figura 45. $\lambda=0.995$

En el noveno ensayo se trabajó de forma similar al octavo, pero en condiciones ligeramente ricas, como resultado se puede apreciar la tendencia vista anteriormente en este tipo de condiciones, para los ensayos de tipo II, tras alcanzar elevadas eficiencias de conversión el CO, al alcanzarse temperaturas elevadas el CO sufre un descenso en su rendimiento, se puede apreciar también un claro aumento de las concentraciones de H₂ a elevadas temperaturas.

Esto se justifica del mismo modo que en casos anteriores, debido a la ausencia de las especies oxidantes en esta fase del ensayo el CO y H₂ generado en la steam reforming no reaccionan con nada, ya que no hay especies para que se de el mecanismo de formación de amoniaco.

Como consecuencia se puede ver como la eficiencia de conversión del hidrógeno decae considerablemente al alcanzar los 350°C, del mismo modo lo hace la del CO pero en menor medida.

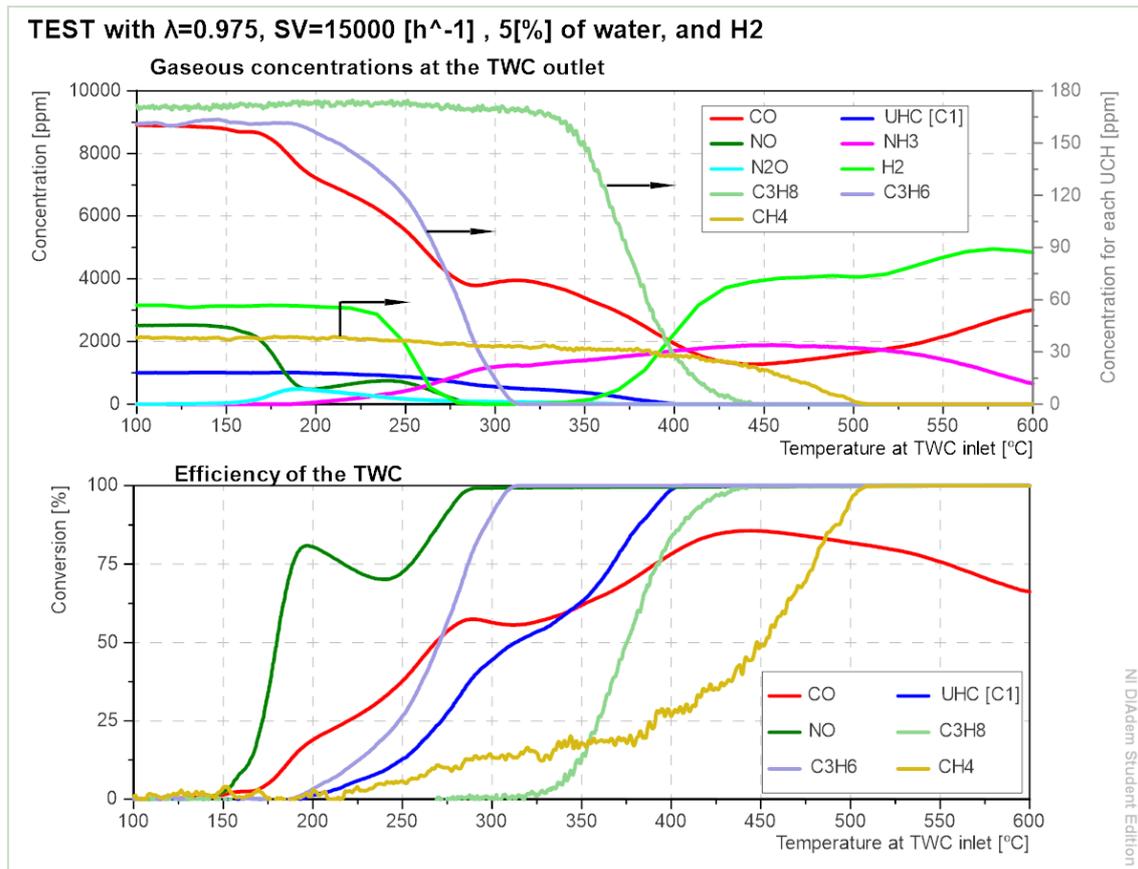
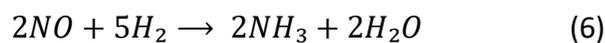
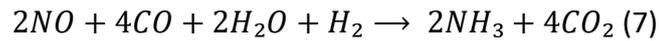


Figura 46. $\lambda=0.975$

En el último ensayo se seleccionó un dosado más rico que en el noveno experimento. Los resultados mostraron las mismas tendencias que en anterior evidenciando una clara dependencia entre la formación de H₂ a elevadas temperaturas y la de CO a través de la *steam reforming* (7). Por tanto, como era previsible debido a la ausencia de O₂ se forma CO a elevadas temperaturas mientras se oxidan los hidrocarburos a su vez, debido a las reacciones siguientes se puede comprender el aumento de NH₃ en presencia de NO y H₂:





Finalmente se puede ver como la tendencia en entre la evolución del CO y el amoniaco es la misma que en el séptimo ensayo.

Eficiencias de conversión y formación de especies

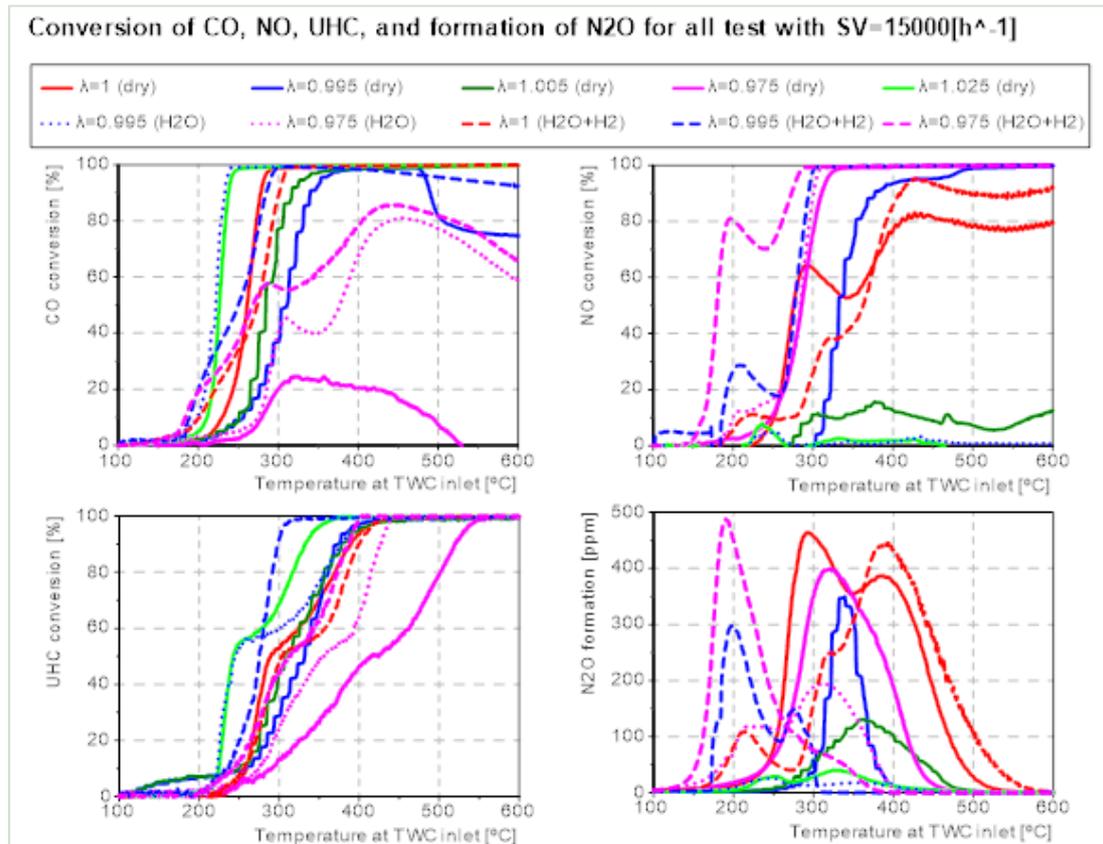


Figura 47. Eficiencias de conversión CO, UHC, NO y formación de N₂O

En la *figura 47*. se puede visualizar las eficiencias de conversión del CO, HC, NO y la formación de la especie N₂O a lo largo de los diez ensayos descritos previamente.

Por su parte, las eficiencias de conversión del CO decrecen considerablemente para $\lambda=0.975$, registrando sus valores más bajos cuando la humedad relativa en del 0%, respecto a la presencia de H₂ y vapor de agua en este punto se puede concluir que mejora ligeramente los resultados obtenidos. Por otro lado, los mejores resultados en cuanto al rendimiento de conversión de esta especie se hallan para condiciones pobres, evidenciándose el efecto que tiene el exceso de oxígeno.

El comportamiento del NO muestra claramente el efecto contrario al del CO, donde las peores eficiencias se registran en condiciones ricas como cabía esperar.

Respecto al comportamiento de los UHC, se debe mencionar que la gran diferencia entre los ensayos ha sido la temperatura de light-off, en este aspecto la presencia de vapor de agua e hidrógeno provocan, en líneas generales, la reducción de dicho valor.

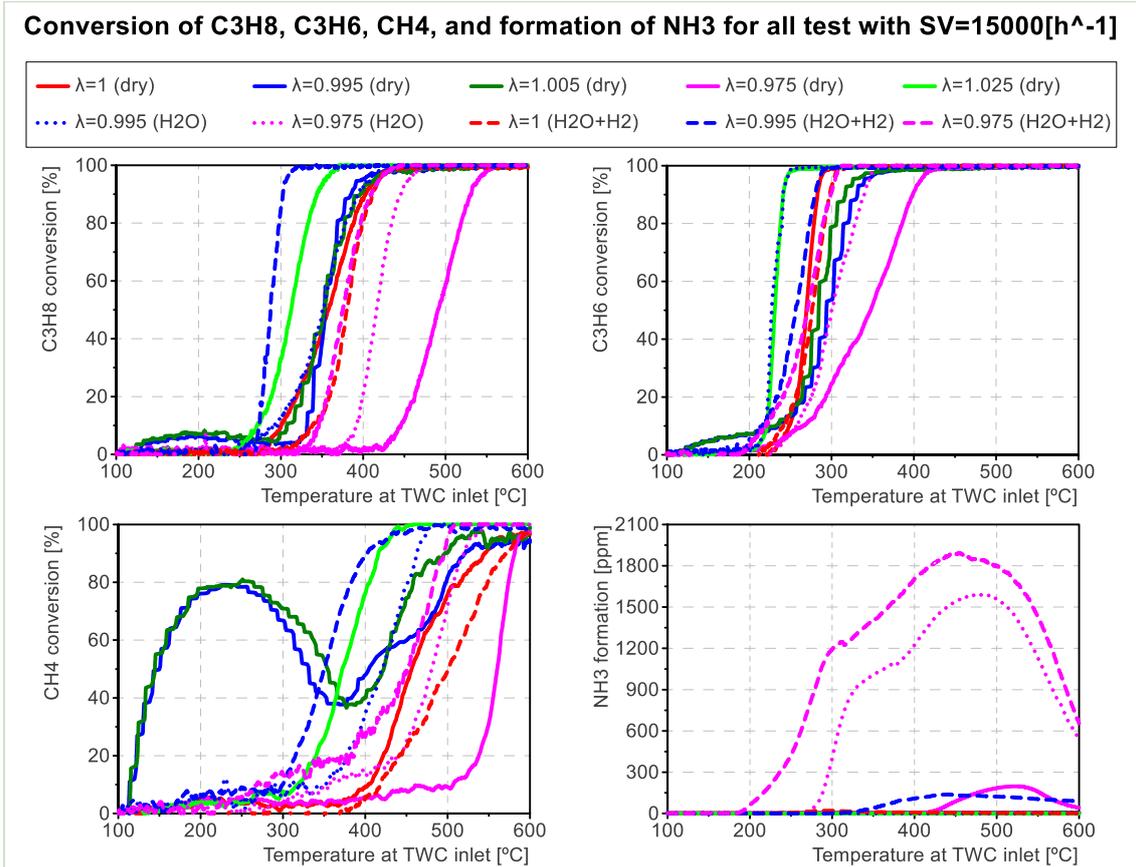


Figura 48. Eficiencias de conversión C₃H₆, C₃H₈, CH₄ y formación de NH₃

En la Figura 48. Se pueden ver desglosadas las tendencias de cada uno de los hidrocarburos introducidos en la mezcla. En el caso del propileno y del propano se alcanzan rendimientos de conversión superiores al 90% entre los 250 °C y 500 °C. Por otra parte, el caso del CH₄ presenta fluctuaciones notables en la eficiencia de conversión, esto posiblemente esté motivado por la sensibilidad de esta especie a lo largo del proceso y a su baja concentración en comparación al resto de especies, a pesar de ello se alcanzan rendimientos de entorno al 98% a temperaturas próximas a 600 °C.

Por último, el NH₃ es un producto que se forma principalmente en condiciones ricas y a elevadas temperaturas, además se puede concluir mirando los resultados que la presencia de vapor de agua y H₂ aumenta el rango de temperaturas en las que se da este proceso y a su vez incrementa considerablemente las concentraciones de esta especie a la salida del reactor.

Efecto sobre la temperatura de light-off

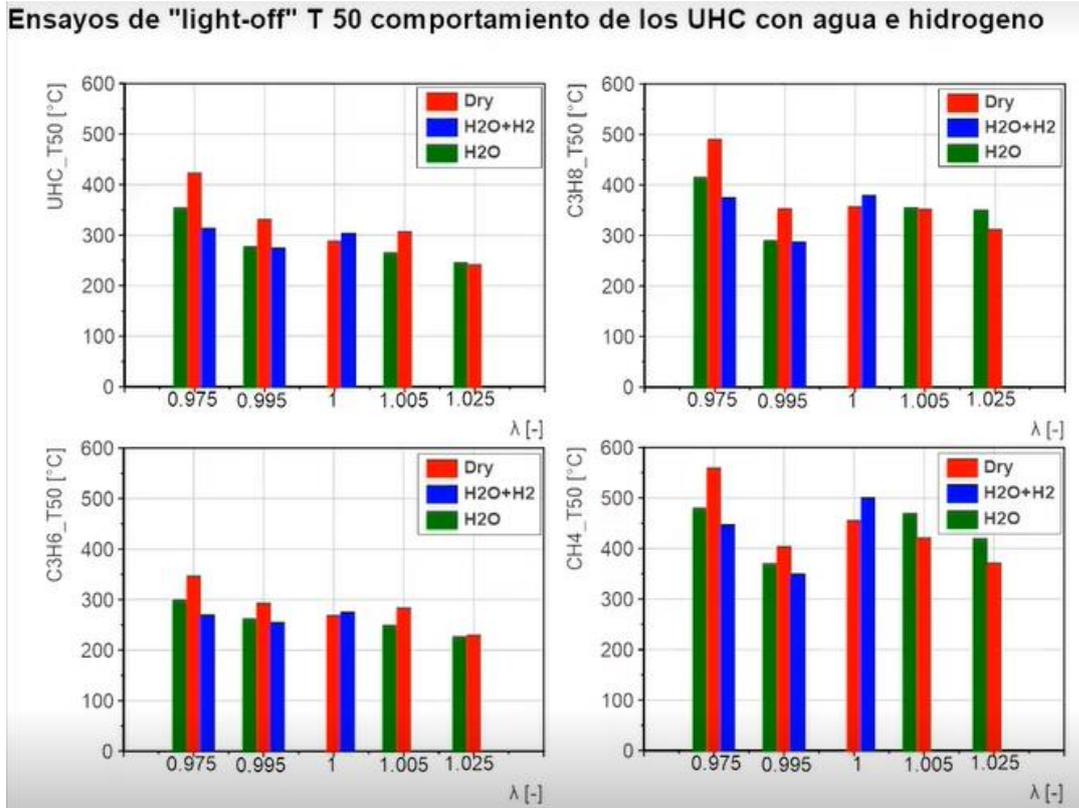


Figura 49. Comportamiento T50 de los UHC en los ensayos con agua e hidrógeno

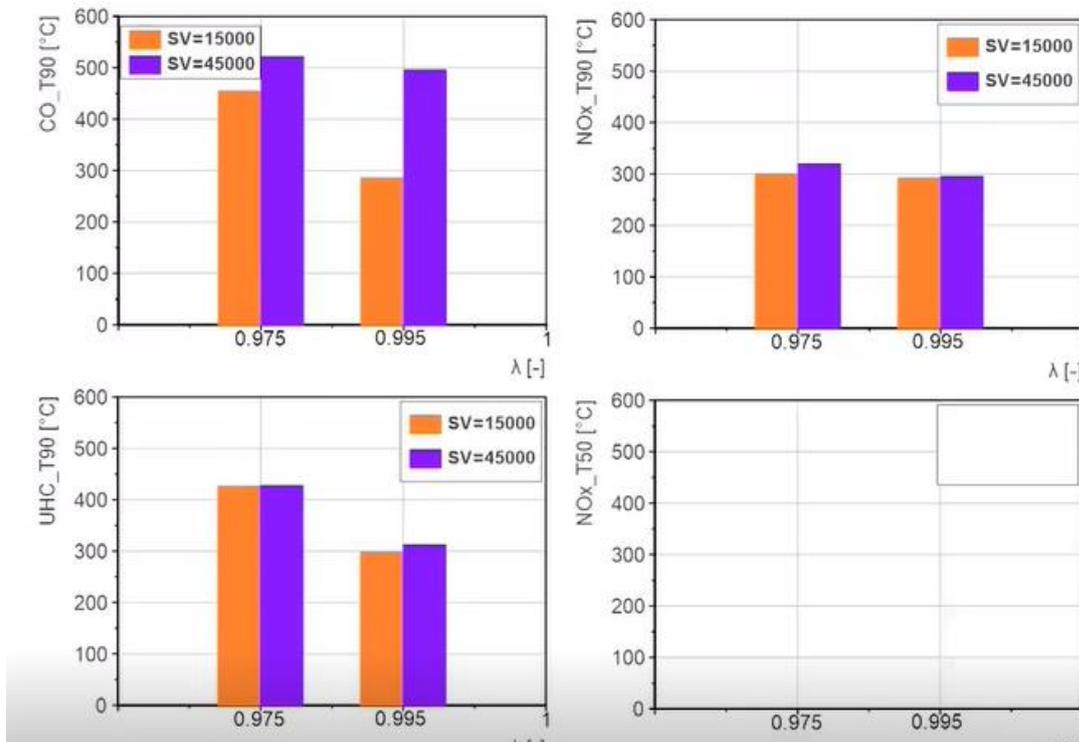


Figura 50. Comportamiento T90 de CO, UHC y NO_x en función del SV

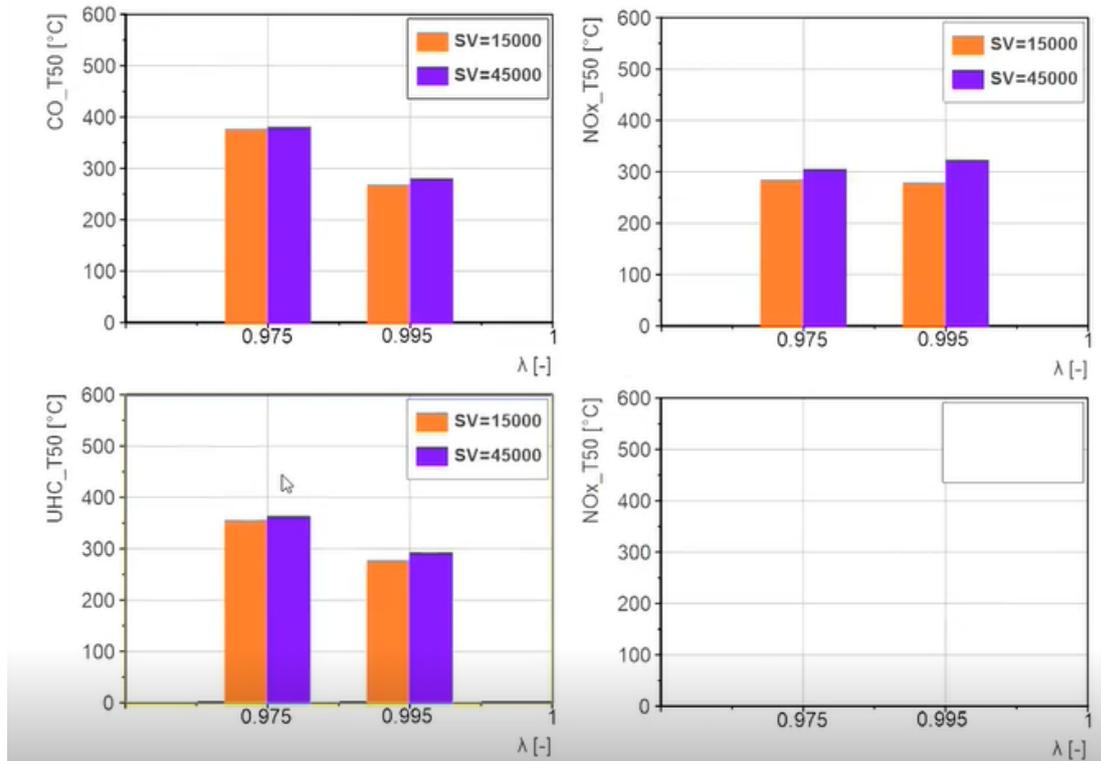
Comparativa de T 50 para space velocity de 15000 y de 45000

Figura 51. Comportamiento T50 de CO, UHC y NO_x en función del SV

En este apartado se analiza el impacto de los parámetros sobre la T50 y T90, refiriéndose estos términos a las temperaturas a las que se alcanzan el 50% y el 90% de rendimiento de conversión de la especie en cuestión.

Respecto a la influencia de los parámetros analizados sobre la temperatura de light-off, como se puede ver en la *figura 49*, el propileno alcanza el 50% de eficiencia de conversión a las temperaturas más bajas en los tres tipos de ensayo, y el metano es el que lo hace a las temperaturas más altas, a su vez, se puede observar que al introducir vapor de agua, las energías de activación de todo el proceso se reducen, dando como resultado menores T50, excepto en el caso $\lambda \sim 1$.

En cuanto al efecto del SV, se aprecia en las *figuras 50* y *51* al aumentar este parámetro se reduce el tiempo de residencia, esto implica que es necesario más tiempo para que se den las reacciones en el interior del monolito aumentando la T90 y T50





6. Conclusiones

Tras finalizar la campaña experimental con el TWC y realizar un análisis posterior, se ha podido verificar el correcto funcionamiento de la instalación, al reconocer ciertas tendencias, ya conocidas a nivel teórico, y a la vez se ha podido estudiar las dependencias entre los distintos parámetros y las especies involucradas. Todo ello ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:

En primer lugar, la reactividad de los UHC está estrechamente relacionado con el número de enlaces simples carbono-carbono, siendo más reactivo cuanto mayor es el número de enlaces, de forma que, inicialmente se consume el UHC con menor cantidad de enlaces C-C, que es el propileno y el último en consumirse es el metano.

Por su parte, el NH_3 es una especie que se forma en condiciones ricas y a temperaturas generalmente elevadas ($>300^\circ\text{C}$), siempre y cuando haya presencia de H_2O . Además, el CO y el NH_3 presentan tendencias inversas a elevadas temperaturas en presencia de H_2O , esto se debe a la formación de H_2 a través de la reacción de *water-shift*.

También, se puede llegar a la conclusión de que la presencia de vapor de agua y H_2 en condiciones ricas posibilita el proceso de formación de NH_3 y produce un aumento de la temperatura de *light-off*. Y con relación al vapor de agua, también se ha percibido que provoca un descenso global de la energía de activación de los procesos químicos que se dan en el TWC.

En cuanto a la oxidación parcial de hidrocarburos adquiere importancia a elevadas temperaturas en condiciones ricas, sin embargo, no se tiene en cuenta en la mayoría de los modelos dado que se trata de un punto relativamente lejano al de funcionamiento óptimo del catalizador de tres vías

Cabe mencionar, que al desplazarse a condiciones pobres se puede observar una mayor selectividad de las especies a la hora de reaccionar con el O_2 de allí el comportamiento del NO en estas condiciones de operación para este tipo de sistemas.

También, se ha podido verificar que al aumentar el *space velocity* las temperaturas de *light-off* se desplazan a valores mayores en todas las especies involucradas en el proceso.

Para finalizar, este trabajo ha permitido comprender mejor el funcionamiento del catalizador de tres vías cuando este opera con gas licuado del petróleo en diferentes dosados de operación de modo que se han podido ver las diferentes tendencias de las especies involucradas a medida que aumenta la temperatura del sistema, todo ello justificado a través del modelo del mecanismo químico empleado en los ensayos del banco motor.

Por otro lado, cabe destacar que este trabajo también resulta útil como una base de datos fiable para futuros estudios relacionados con el desarrollo de nuevos modelos de mecanismo químico en un TWC.







7. Referencias

- [1] F.Payri, J.M. Desantes ,*Motores de combustión interna alternativos*. Editorial Reverté Editorial UPV;2011
- [2] P.Piqueras, *Lesson 1. Legislation*,2020
- [3] G.Sáenz Ojeda, *Estudio teórico de la aplicación de Gases Licuados de Petróleo (GLP) en unidades de potencia de vehículos híbridos para el transporte público*,2017
- [4] M.Calderón Sierra, E.Y Calderón, *Análisis Ambiental Comparativo del Uso del Gas Licuado del petróleo (GLP) como combustible sustituto del Gas Natural Vehicular (GNV) en Colombia*, 2018
- [5] CMT Motores Térmicos, *Manual de funcionamiento del FTIR MKS modelo 2030*,2019
- [6] CMT Motores Térmicos, *Main characteristics of the synthetic gas bench (SGTB)*,2022
- [7] CMT Motores Térmicos, *Documentación técnica Iberfluid instruments S.A*, 2021
- [8] P.Piqueras, *Lesson 2.Catalyst fundamentals*,2020
- [9] B.O.E. -Núm.64. *Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo*; 16 de marzo de 1971.
- [10] B.O.E.-Núm 97. *Real Decreto 488/1997 sobre disposiciones mínimas de seguridad salud relativas al trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización*; 14 de abril de 1997.



8.Anexos

Anexo 8.1. Factores de conversión de gases

Nombre	Símbolo	Densidad [g/l], 0°C,1 atm	Factor de conversión, 20°C,1 atm
Acetileno	C ₂ H ₂	1.172	0.438
Aire	air	1.293	1
Amoniaco	NH ₃	0.7693	0.77
Argón	Ar	1.784	1.4
Bromuro de hidrógeno	HBr	3.646	0.98
Butano	C ₄ H ₁₀	2.705	0.25
Ciclopropano	C ₃ H ₆	1.919	0.43
Cloruro de hidrógeno	HCl	1.639	0.99
Dióxido de azufre	SO ₂	2.922	0.68
Dióxido de carbono	CO ₂	1.977	0.74
Dióxido de nitrógeno	NO ₂	2.053	0.74
Etano	C ₂ H ₆	1.355	0.49
Etileno	C ₂ H ₄	1.261	0.6
Fluoruro de hidrógeno	HF	0.8926	0.96
Helio	He	0.1785	1.41
Hidrógeno	H ₂	0.0899	1.01
Metano	CH ₄	0.7175	0.76
Monóxido de carbono	CO	1.25	1
Nitrógeno	N ₂	1.25	1
Óxido de nitrógeno	NO	1.34	0.97
Oxígeno	O ₂	1.429	0.98
Ozono	O ₃	2.154	0.7
Propano	C ₃ H ₈	2.012	0.34
Propileno	C ₃ H ₆	1.915	0.4
Sulfuro de hidrógeno	H ₂ S	1.536	0.82
Trifluoruro de nitrógeno	NF ₃	3.182	0.5
Xenón	Xe	5.899	1.38

Tabla 7. Factores de conversión de gases para el mezclador

Anexo 8.2 Especificaciones del CEM

El Bronkhorst HIGH-TECH B.V series CEM es un sistema que permite controlar flujos y mezclas gaseosas de hasta 1000 g/h. Se trata de un sistema completo que consta de una válvula de mezclado, un dispositivo de calentamiento, un medidor de líquidos y un controlador del flujo másico para el gas o gases de arrastre. El flujo de líquido a través del medidor es controlado por la válvula de mezclado.

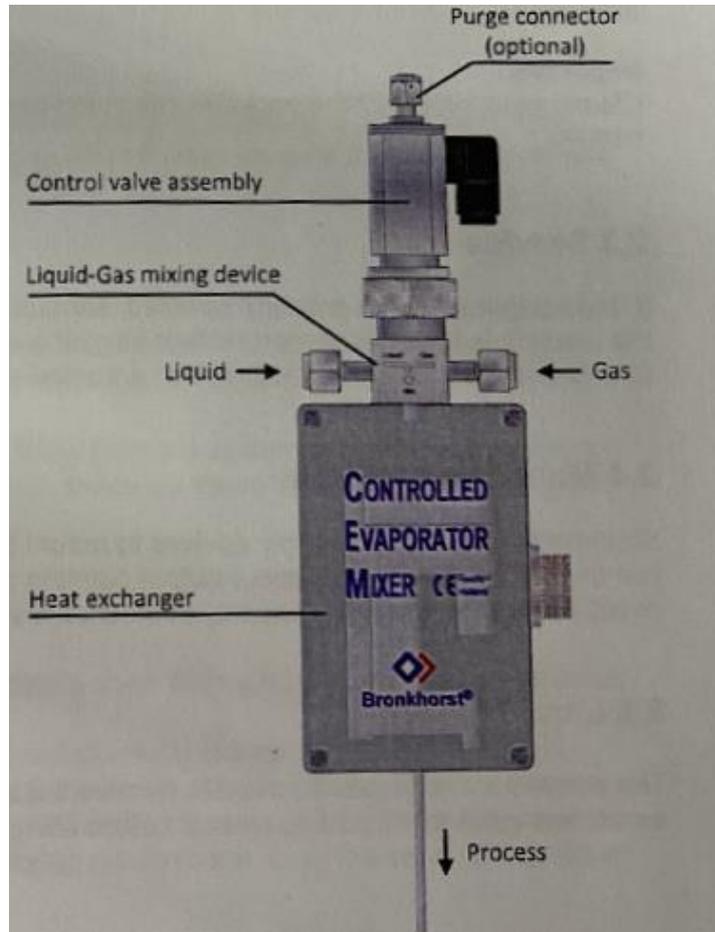


Figura 52. Esquema CEM

Principio de operación

La abreviatura CEM viene de:

- “C” de control del flujo de la mezcla gaseosa o líquida.
- “E” de evaporación del flujo debido a la temperatura impuesta a través del dispositivo de calentamiento.
- “M” de mezcla gaseosa/líquida.



A temperatura ambiente el líquido de trabajo, normalmente agua, se traslada desde un contenedor mediante la presión ejercida por un gas inerte, por su parte el líquido extraído es medido por un caudalímetro para verificar que el flujo requerido para el ensayo ha sido alcanzado. Por su parte el gas de arrastre, controlado por otro caudalímetro (MFC), se emplea para estimular el proceso de evaporación y, además sirve como medio para transportar la mezcla. Se trata de un proceso donde se con una elevada repetitividad de modo que se garantiza la evaporación de las especies en estado líquido, así como su eficiencia.

Purga del sistema

Si durante el ensayo se utilizan fluidos corrosivos o reactivos es indispensable la purga del sistema con gases inertes, esto se debe a que existe la posibilidad de que la presencia de estas sustancias en combinación con el aire ambiente puede provocar corrosión u obstrucciones en el sistema.

Anexo 8.3 Pliego de condiciones

Introducción

En esta sección se procederá a desglosar y detallar los requisitos necesarios que debe cumplir el lugar de trabajo según la Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo.

Por otro lado, también se hará hincapié en las disposiciones mínimas de seguridad y salud a la hora de usar equipos con pantallas de visualización, todo ello en el Real Decreto 488/1997 del 14 de abril. En cuanto al nivel adecuado de los trabajadores en las condiciones de trabajo se hará mención sobre lo detallado en la Ley 31/1995 del 8 de noviembre sobre la Prevención de Riesgos Laborales.

Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo (9)

Artículo 13: Seguridad estructural

Todos los edificios, permanentes o provisionales, serán de construcción segura y firme para evitar riesgos de desplome y los derivados de los agentes atmosféricos. Para ello, los cimientos, pisos y demás elementos de los edificios ofrecerán resistencia suficiente para sostener y suspender con seguridad las cargas para los que han sido calculados.

Por otra parte, para preservar esta seguridad se indicará por medio de rótulos o inscripciones las cargas que los locales puedan soportar o suspender, quedando prohibido sobrecargar los pisos y plantas de los edificios.

Artículo 14: Superficies y cubicación

Los locales de trabajo deben cumplir las siguientes condiciones mínimas:

- Tres metros de altura desde el piso al techo.
- Dos metros cuadrados de superficie por cada trabajador.
- Diez metros cúbicos por cada trabajador.

No obstante, en los establecimientos comerciales, de servicios y locales destinados a oficinas y despachos la altura a que se refiere el apartado a) del número anterior podrá quedar reducida hasta 2,5 m, pero respetando la cubicación por trabajador que se establece en el apartado c), y siempre que se renueve el aire suficientemente. Para el cálculo de la superficie y volumen no se tendrán en cuenta los espacios ocupados por máquinas, aparatos, instalaciones y materiales.

Artículo 15: Suelos, techos y paredes

El pavimento constituirá un conjunto homogéneo, llano y liso sin soluciones de continuidad; será de un material consistente, no resbaladizo o susceptible de serlo con

el uso y de fácil limpieza. Además, deberá estar al mismo nivel, y de no ser así, se salvarán las diferencias de altura por rampas de pendiente no superior al 10 %.

Los techos y las paredes deberán reunir las condiciones suficientes para resguardar a los trabajadores de las inclemencias del tiempo. Si están pensados para soportar o suspender cargas deberán reunir las condiciones que se establecen en el artículo 13.

Artículo 20: Plataformas de trabajo

Las plataformas de trabajo ya sean fijas o móviles, estarán construidas de materiales sólidos, y su estructura y resistencia será proporcionada a las cargas fijas o móviles que hayan de soportar. Además, los pisos y pasillos de las plataformas de trabajo serán antideslizantes, se mantendrán libres de obstáculos y estarán provistas de un sistema de drenaje.

En el momento de la realización de trabajos sobre plataformas móviles se emplearán dispositivos de seguridad que eviten su desplazamiento o caída.

Artículo 24. Puertas y salidas

Las salidas o puertas exteriores y las de comunicación con el interior serán suficientes en número y anchura para que todos los trabajadores ocupados en los mismos puedan abandonarlos con rapidez, eficacia y seguridad. A su vez, en los accesos no se permitirán obstáculos que interfieran la salida normal de los trabajadores, evitando en todo caso las aglomeraciones.

La distancia máxima entre las puertas de salida al exterior no excederá de 45 metros. El ancho mínimo de las puertas exteriores será de 1,20 metros cuando el número de trabajadores que las utilicen normalmente no exceda de 50, y se aumentará el número de aquéllas o su anchura por cada 50 trabajadores más o fracción en 0,50 metros más.

Ninguna puerta de acceso a los puestos de trabajo o a sus plantas permanecerá cerrada de manera que impida la salida durante los períodos de trabajo. Las puertas de acceso a las escaleras no se abrirán directamente sobre sus escalones, sino sobre descansos de anchura igual a la de aquéllos.

En los centros de trabajo expuestos singularmente a riesgos de incendio, explosión, intoxicación súbita y otros que exijan una rápida evacuación serán obligatorias dos salidas, al menos, al exterior, sitas en lados distintos de cada local.

Artículo 25. Iluminación. Disposiciones generales

Todos los lugares de trabajo o tránsito tendrán iluminación natural, artificial o mixta apropiada a las operaciones que se ejecuten. Empleando iluminación natural siempre que sea posible.

Se intensificará la iluminación de máquinas peligrosas, lugares de tránsito con riesgo de caídas, escaleras y salidas de urgencia.

Artículo 30. Ventilación, temperatura y humedad

En los locales de trabajo y sus anexos se mantendrán, por medios naturales o artificiales, condiciones atmosféricas adecuadas, evitando el aire viciado, exceso de calor y frío, humedad o sequía y los olores desagradables.

En ningún caso el anhídrido carbónico ambiental podrá sobrepasar la proporción de 50/10.000, y el monóxido de carbono, la de 1/10.000.

En los locales de trabajo cerrados, el suministro de aire fresco y limpio por hora y trabajador será, al menos, de 30 a 50 metros cúbicos, salvo que se efectúe una renovación total del aire varias veces por hora, no inferior a seis veces para trabajos sedentarios ni diez veces para trabajos que exijan esfuerzo físico superior al normal.

La circulación de aire en locales cerrados se acondicionará de modo que los trabajadores no estén expuestos a corrientes molestas y que la velocidad del aire no exceda de 15 metros por minuto con temperatura normal, ni de 45 metros por minuto en ambientes muy calurosos.

En los centros de trabajo expuestos a altas y bajas temperaturas serán evitadas las variaciones bruscas por el medio más eficaz. Cuando la temperatura sea extremadamente distinta entre los lugares de trabajo, deberán existir locales de paso para que los operarios se adapten gradualmente a unas y otras.

Se fijan como límites normales de temperatura y humedad en locales y para los distintos trabajos, siempre que el procedimiento de fabricación lo permita, los siguientes:

- Para trabajos sedentarios: De 17 a 22 o C.
- Para trabajos ordinarios: De 15 a 18 o C.
- Para trabajos que exijan acusados esfuerzos musculares: De 12 a 15 o C.

La humedad relativa de la atmósfera oscilará del 40% al 60%, salvo en instalaciones en que haya peligro por generarse electricidad estática, quedando en este caso limitada al 50 %.

Todos los trabajadores estarán debidamente protegidos contra las irradiaciones directas y excesivas de calor. En los trabajos que hayan de realizarse en locales cerrados con extremado frío o calor se limitará la permanencia de los operarios estableciendo, en su caso, los turnos adecuados.

Artículo 31. Ruidos, vibraciones y trepidaciones

Los ruidos y vibraciones se evitarán o reducirán en lo posible en su foco de origen, tratando de aminorar su propagación en los locales de trabajo. De esta forma, el anclaje de máquinas y aparatos generadoras de ruidos, vibraciones y trepidaciones se ha de realizar con aplicación de las técnicas más eficaces, a fin de lograr su óptimo

equilibrio estático y dinámico, tales como bancadas cuyo peso sea superior entre 1.5 y 2.5 veces el peso de la máquina que soportan, por aislamiento de la estructura general o por otros recursos técnicos.

El anclaje y todas las máquinas que produzcan ruidos, vibraciones o trepidaciones molestas deben ser aisladas adecuadamente y en el recinto de aquellas, sólo debe trabajar el personal correspondiente para su mantenimiento durante el tiempo indispensable.

Queda prohibido instalar máquinas o aparatos ruidosos adosados a paredes o columnas de las que distarán como mínimo: 0,70 metros de los tabiques medianeros y un metro de las paredes exteriores o columnas.

Se debe extremar el cuidado y mantenimiento de las máquinas u aparatos que produzcan vibraciones molestas o peligrosas a los trabajadores, especialmente con los órganos móviles y los dispositivos de transmisión de movimiento de las vibraciones que generan estas máquinas.

El control de ruidos agresivos en centros de trabajo no se limita únicamente al aislamiento del foco que los produce, sino que también se han de adoptar las prevenciones técnicas que se requieran para evitar que los fenómenos de reflexión y resonancia alcancen niveles peligrosos para la salud de los trabajadores.

Artículo 32. Limpieza de locales

Los locales y las dependencias anejas deberán mantenerse en un buen estado, de esta manera los locales deberán someterse a limpiezas periódicas, con la frecuencia necesaria y siempre que sea posible durante las horas de trabajo, con una antelación suficiente para que puedan ser ventilados durante media hora al menos antes de la entrada al trabajo.

Las operaciones de limpieza se realizarán con mayor esmero en las inmediaciones de los lugares ocupados por máquinas, aparatos o dispositivos, cuya utilización ofrezca mayor peligro. El pavimento no estará encharcado y se conservará limpio de aceite, grasas u otras materias resbaladizas.

En los locales susceptibles de producir polvo, la limpieza se efectuará por medios húmedos cuando no sea peligroso, o mediante aspiración en seco cuando el proceso lo permita.

Se evacuarán o eliminarán los residuos de primeras materias o de fabricación, bien directamente por medio de tuberías o acumulándolos en recipientes adecuados. Igualmente se eliminarán las aguas residuales y las emanaciones molestas o peligrosas por procedimientos eficaces. Además, como líquido de limpieza o desengrasado, se emplearán, preferentemente, detergentes.

Real Decreto 488/1997 del 14 de abril (10)

Equipo

La imagen de la pantalla deberá ser estable, sin fenómenos de destellos, centelleos u otras formas de inestabilidad. El usuario de terminales con pantalla deberá poder ajustar fácilmente la luminosidad y el contraste entre los caracteres y el fondo de la pantalla, y adaptarlos fácilmente a las condiciones del entorno. La pantalla será orientable e inclinable a voluntad, con facilidad para adaptarse a las necesidades del usuario.

El teclado deberá ser inclinable e independiente de la pantalla para permitir que el trabajador adopte una postura cómoda que no provoque cansancio en los brazos o las manos. Tendrá que haber espacio suficiente delante del teclado para que el usuario pueda apoyar los brazos y las manos. La superficie del teclado deberá ser mate para evitar los reflejos.

La mesa o superficie de trabajo deberán ser poco reflectantes, tener dimensiones suficientes y permitir una colocación flexible de la pantalla, del teclado, de los documentos y del material accesorio. El soporte de los documentos deberá ser estable y regulable y estará colocado de tal modo que se reduzcan al mínimo los movimientos incómodos de la cabeza y los ojos.

El asiento de trabajo deberá ser estable, proporcionando al usuario libertad de movimiento y procurándole una postura confortable. La altura de este deberá ser regulable. El respaldo deberá ser reclinable y su altura ajustable.

Entorno de trabajo

El puesto de trabajo deberá tener una dimensión suficiente y estar acondicionado de tal manera que haya espacio suficiente para permitir los cambios de postura y movimientos de trabajo.

La iluminación general y las lámparas de trabajo deberán garantizar unos niveles adecuados de iluminación y unas relaciones adecuadas de luminancias entre la pantalla y su entorno, teniendo en cuenta del carácter del trabajo, las necesidades visuales del usuario y tipo de pantalla utilizado.

Las ventanas deberán ir equipadas con un dispositivo de cobertura adecuado y regulable para atenuar la luz del día que ilumine el puesto de trabajo.

Los equipos instalados en el puesto de trabajo no producirán un calor adicional que pueda ocasionar molestias a los trabajadores. Además, toda radiación deberá reducirse a niveles insignificantes desde el punto de vista de la protección de la seguridad y de la salud de los trabajadores.



Interconexión ordenador/persona

El programa deberá de ser fácil de utilizar y, en su caso, poder adaptarse al nivel de conocimientos y de experiencia del usuario; no deberá utilizarse ningún dispositivo cuantitativo o cualitativo de control sin que los trabajadores hayan sido informados.

Los sistemas deberán mostrar la información en un formato que se adapte a los operadores y los principios de ergonomía deberán aplicarse al tratamiento de la información por parte de la persona.

Anexo 8.4 Presupuesto

En esta sección se hará un desglose del coste completo de la tarea realizada para la consecución del proyecto “*Caracterización de un TWC para su aplicación en otores propulsados por GLP*” previamente expuesto. Se hará referencia a los costes de la mano de obra necesaria durante el proyecto, las licencias del software empleado para la obtención y el postproceso de los datos y el hardware que ha permitido la campaña experimental en la que se basa el presente documento. A la hora de estimar los costes se tendrá en cuenta que la duración de la campaña de ensayos ha sido de 5 meses.

Mano de obra

Para el cálculo referente al presupuesto de la mano de obra se ha tenido en cuenta que para llevar a cabo la campaña se ha requerido de la presencia de un profesor contratado doctor, un ingeniero doctor y un ingeniero técnico. En los valores expuestos en la Tabla 5. Se tiene en cuenta que la duración del trabajo de fin de grado, equivalente a 12 ETCS, es de 300 horas y también se ha asumido que el ingeniero tiene un sueldo de becario de departamento.

	Horas (h)	Sueldo (€/h)	Subtotal (€)
Profesor doctor	15	50	750
Ingeniero doctor	150	30	4500
Becario	300	5.33	1599
TOTAL (€)			6849

Tabla 8. Coste mano de obra campaña experimental

Software

En el presenta apartado se desglosa el coste de las licencias empleadas para el tratamiento de datos, y se dejará al margen los precios de los programas que se emplean para el control remoto de los equipos de la instalación de trabajo, siendo estos incluidos en el presupuesto d ellos respectivos equipos.

	Subtotal (€)
Diadem 2021	440
Microsoft Office	149
TOTAL (€)	589

Tabla 9. Coste licencias

Hardware

Dentro de esta sección se detalla el coste de todo el hardware empleado para la realización de la campaña de ensayos que ha dado pie al posterior análisis. Para ello se incluirán en el coste los programas que permiten el control del mezclador del banco de gases sintético, el cromatógrafo y el FTIR respectivamente. Además, se tendrá en cuenta los costes del resto de la instrumentación tales como sensores de presión, termopares, resistencias eléctricas...

	Adquisición (€)	Coste de amortización (-)	Tiempo uso (meses)	Subtotal (€)
Portátil (personal)	650	0.25	5	154.25
Banco de gases + Scada	73000	0.25	5	17323.24
Cromatógrafo + 990 Micro GC	4430	0.25	2	2491.88
FTIR + MG-2000	11200	0.25	5	2657.81
TOTAL (€)				22627.18

Tabla 10. Coste equipo de la instalación

	Unidades	Coste unitario (€/unidad)	Coste total (€)
Reactor	1	450	450
Termopar	2	40	80
Sensores de presión	2	700	1400
Sonda Horiba Mexa 720	1	12000	12000
Resistencias eléctricas	2	129	258
Horno	1	4500	4500
TOTAL (€)			18688

Tabla 11. Coste sensores de la instalación

Presupuesto total de la actividad

De este modo el coste total de la actividad realizada teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto será de:

Coste mano de obra (€)	6849
Coste licencias (€)	589
Coste equipos (€)	22627.18
Coste sensores (€)	18688
TOTAL (€)	48753.18

Tabla 12. Coste total del proyecto



