



## UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

### Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial y Diseño Industrial

Caracterización experimental del proceso de combustión en un quemador gaseoso atmosférico alimentado con metano e hidrógeno

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

AUTOR/A: Boukhari Boutayb, Haitam Tutor/a: García Oliver, José María CURSO ACADÉMICO: 2023/2024





### Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial y Diseño Industrial

Caracterización experimental del proceso de combustiónen un quemador gaseoso atmosférico alimentado con metano e hidrógeno

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

AUTOR/A: Boukhari Boutayb, Haitam

Tutor/a: García Oliver, José María

CURSO ACADÉMICO: 2023-2024

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial y Diseño Industrial

## Agradecimientos

Me gustaría en primer lugar agradecer a mi tutor José María García Oliver por ofrecerme la oportunidad de realizar este Trabajo Fin de Grado y guiarme durante la realización de este durante estos meses.

También querría agradecer la ayuda que en todo momento me ha brindado Elkin Josue Ramirez Garcia, guiándome y enseñándome las instalaciones en las que estuve trabajando así como ayudándome con el post-proceso.

Por último, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia, la cual me ha apoyado incondicionalmente durante estos últimos meses, así como durante toda mi trayectoria estudiantil.

II

### Resumen

El siguiente documento pretender exponer las bases teóricas y experimentales, así como los resultados obtenidos en el trabajo de fin de grado basado en la caracterización experimental del proceso de combustión en un quemador gaseoso atmosférico.

En el marco de la transición energética, objetivo de suma importancia en los últimos años, las turbinas de gas cobran especial importancia tanto para la producción de energía eléctrica como en aplicaciones aeronáuticas. En cualquiera de los dos casos existe un gran interés de cara a su alimentación con hidrógeno, un combustible cuyas características son muy diferentes de los habitualmente empleados.

Teniendo en mente la meta de reducir las emisiones se ha procedido a evaluar de manera experimental en un quemador atmosférico de combustión premezclada las características de las llamas al pasar de metano a hidrógeno. Para ello se emplearán imágenes de radiación ultravioleta para evaluar las características de la zona de reacción de la llama bajo diferentes condiciones de operación. Estas imágenes serán analizadas mediante rutinas de post-procesado elaboradas con Python para poder sacar conclusiones y realizar un análisis que permitirá identificar que condiciones de operación son las óptimas desde el punto de vista de la reducción de emisiones

### Abstract

The following document aims to outline the theoretical and experimental foundations, as well as the results obtained in the final degree project based on the experimental characterization of the combustion process in an atmospheric gas burner.

Within the framework of the energy transition, a goal of utmost importance in recent years, gas turbines have gained particular relevance both for electricity generation and in aeronautical applications. In both cases, there is great interest in using hydrogen as a fuel, a fuel with characteristics very different from those commonly used.

With the goal of reducing emissions in mind, an experimental evaluation has been carried out on an atmospheric premixed combustion burner to analyze the flame characteristics when switching from methane to hydrogen. Ultraviolet radiation images will be used to assess the characteristics of the flame's reaction zone under different operating conditions. These images will be analyzed using post-processing routines developed with Python to draw conclusions and conduct an analysis that will identify the optimal operating conditions from an emissions reduction perspective.

### INDICE

Agradecimientos I
Resumen III
AbstractV
Índice de figurasX
Índice de tablasXII
1. Introducción 1
1.1. Contexto y antecedentes 1
1.2. ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible)2
1.3. Objetivos del trabajo 3
1.4. Metodología 4
1.5. Estructura del documento 4
2. Base teórica
2.1. Metano
2.2. Turbina de gas
3. Instalaciones experimentales 12
3.1. Introducción 12
3.2. Quemador atmosférico 13
3.3. Conductos
3.3.1. Estabilización de la llama15
3.4. Cámara de combustión 16
3.5. Equipamiento experimental 19
3.6. Parámetros de operación 20
3.6.1. ma 20
3.6.2. <i>φ</i>
3.6.3. AP
3.7. Termopares
3.8. Aparatos de medición de emisiones 23
4. Procedimiento experimental 25
4.1. Introducción 25
4.2. Pasos preliminares
4.3. Plan de ensayos

4.3.1. Advertencias
5. Post-procesado
5.1. Introducción
5.2. Rutina de post-procesado 32
5.3. Longitud de despegue (Lift-off length) y ángulo de apertura de la llama 33
6. Análisis de resultados
6.1. Introducción
6.2. Análisis de la estabilidad y la estructura de la llama (AP = $0\%$ ) 37
6.3. Análisis de la estabilidad y la estructura de la llama ( $ma = 13 kg/h$ )
6.4. Emisiones de NO 44
7. Conclusiones
8. Bibliografía 49
9. Presupuesto
9.1. Costes por mano de obra 52
9.2. Costes por materiales y equipo53
9.3. Presupuesto total 53
Pliego de condiciones
Condiciones de los materiales58
Condiciones de la ejecución58
Normativa de seguridad 58
Marco legal
Real Decreto 488/1997, de 14 de abril58

# Índice de figuras

Figura 1: Objetivos de desarrollo sostenible	3
Figura 2: Metodología de trabajo	4
Figura 3: Formulación orgánica del metano	6
Figura 4: Impacto de diferentes compuestos sobre la temperatura del planeta	7
Figura 5: Cantidad de metano en la atmósfera	8
Figura 6: Ciclo Brayton	8
Figura 7: Turbina de gas	9
Figura 8: Representación gráfica de las instalaciones	12
Figura 9: Foto de las instalaciones	13
Figura 10: Quemador atmosférico	14
Figura 11: Representación de los conductos	15
Figura 12: Swirler	15
Figura 13: Cámara de combustión	17
Figura 14: Foto de la cámara de combustión	18
Figura 15: Generador de chispa	18
Figura 16: Equipamiento experimental	19
Figura 17: Swirler 60°	19
Figura 18: Termopar	22
Figura 19: Ubicación de los termopares	22
Figura 20: PLC	26
Figura 21: Excel para punto de encendido	28
Figura 22: Llama	29
Figura 23: Blow off	29
Figura 24: Opciones post-procesado	32
Figura 25: Imagen post-procesada	33
Figura 26: Alfa y Lift-off length	33
Figura 27: Cálculo del ángulo de apertura	34
Figura 28: Imágenes post-procesadas para el barrido de datos AP = 0%	38
Figura 29:Ángulo de apertura en función de ma	39
Figura 30: Ángulo de apertura en función del dosado	40
Figura 31: Imágenes post-procesadas para el barrido de datos ma = 13 kg/h	41
Figura 32: Achatamiento de la llama	42
Figura 33: Ángulo de apertura en función del AP	42
Figura 34: Ángulo de apertura en función del dosado II	43
Figura 35: Emisiones NO	45

## Índice de tablas

Tabla 1:Flujo másico de aire del soplador	. 13
Tabla 2: Medidas I	. 20
Tabla 3: Medidas II	. 20
Tabla 4: Barrido ensayos AP = 0%	. 39
Tabla 5: Barrido ensayos ma = 13 kg/h	. 42
Tabla 6: Puntos de apagado	. 44
Tabla 7: Rango de valores	. 44
Tabla 8: Coste por mano de obra	. 52
Tabla 9: Coste por materiales y equipo	. 53
Tabla 10: Presupuesto del proyecto	. 53
Tabla 11:Coste total	. 53

### 1. Introducción

#### 1.1. Contexto y antecedentes

A medida que se intensifica el desafío del cambio climático, la ingeniería se centra en desarrollar tecnologías nuevas y menos contaminantes para reducir sus efectos. En el proceso de transición hacia tecnologías más sostenibles, el hidrógeno se ha convertido en una opción sólida y prometedora. Este elemento se promueve activamente como combustible innovador para la producción de energía, el transporte y la aviación.

En este contexto, las turbinas de gas son particularmente importantes. Utilizar hidrógeno como combustible no sólo reduce significativamente las emisiones contaminantes, sino que también aprovecha su disponibilidad, siendo el hidrógeno el elemento más abundante en el universo. Los beneficios duales de la reducción de emisiones y la abundante disponibilidad hacen del hidrógeno una alternativa viable y sostenible a los combustibles tradicionales.

Dado el potencial del hidrógeno, es razonable y necesario invertir importantes recursos económicos y tiempo en desarrollar y optimizar las tecnologías necesarias para su uso eficaz. Estos esfuerzos no solo ayudan a reducir las emisiones de carbono, sino que también logran avances significativos en una variedad de industrias, allanando el camino hacia un futuro energético más limpio y sostenible.

Para ello, pruebas experimentales con metano serán realizadas para poder comparar el impacto ambiental y la reducción de las emisiones que supondría transicionar hacia energías más limpias. Estas pruebas serán realizadas en un quemador de gas atmosférico en el CMT que está pensado para futuros proyectos con hidrógeno.

Adicionalmente, también se estudiará la estabilidad y estructura de las llamas al operar bajo diferentes parámetros de encendido.

La combustión utilizada en este estudio es combustión premezclada, un tipo de combustión en la que el oxidante y el combustible se mezclan completamente antes de la combustión. Este método no sólo garantiza una combustión más eficiente, sino que también reduce significativamente las emisiones de óxido de nitrógeno (NOx) y partículas, lo que lo convierte en una opción atractiva desde el punto de vista de la protección del medio ambiente. Sin embargo, las emisiones de óxido de nitrógeno no son las únicas, sino que en la combustión también se pueden generar emisiones de CO2, CO, NO, NO2 e hidrocarburos sin quemar, entre otros, siendo el CO2 el principal compuesto contaminante del planeta pues es el principal causante del calentamiento global.

#### 1.2. ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible)

En septiembre de 2015, los líderes mundiales aprobaron un conjunto de 17 metas adoptadas por todos los países miembros de la ONU como parte de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, cuyos objetivos son erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos. En este contexto, la ciencia toma un papel crucial como precursora de nuevas tecnologías las cuales permitan alcanzar las metas establecidas.

Los 17 objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 son:

- ODS 1. Fin de la pobreza
- ODS 2. Hambre cero
- ODS 3. Salud y bienestar
- ODS 4. Educación de calidad
- ODS 5. Igualdad de género
- ODS 6. Agua limpia y saneamiento
- ODS 7. Energía asequible y no contaminante
- ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico
- ODS 9. Industria, innovación e infraestructura
- ODS 10. Reducción de las desigualdades
- ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles
- ODS 12. Producción y consumo responsables
- ODS 13. Acción por el clima
- ODS 14. Vida submarina
- ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres
- ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas
- ODS 17. Alianzas para lograr los objetivos



Figura 1: Objetivos de desarrollo sostenible

Este proyecto tiene como objetivo caracterizar experimentalmente el proceso de combustión entre otros motivos para reducir las emisiones contaminantes a la atmósfera generadas durante la combustión del metano, por lo que este trabajo abarcaría sobre todo los siguientes ODS: el ODS 7 (Energía Asequible y No Contaminante), el ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) y el ODS 13 (Acción por el Clima)

ODS 7: este proyecto se relaciona con este ODS debido a que uno de sus objetivos es la reducción de la contaminación por medio del desarrollo de tecnologías más verdes.

ODS 11: respecto a este ODS, el desarrollo de tecnologías menos contaminantes supondría ciudades y comunidades más sostenibles al usar estas en los medios de transporte y la generación de energía.

ODS 13: el proyecto está directamente relacionado con este ODS, ya que una reducción de emisiones contaminantes ayudaría de manera directa al clima, reduciendo el calentamiento global entre otros.

#### 1.3. Objetivos del trabajo

El objetivo principal de este trabajo se enfoca en la parte metodológica de un proyecto que tiene como meta caracterizar y optimizar las condiciones de trabajo de un quemador de gas atmosférico, teniendo como meta la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera y una mayor estabilización de las llamas. Para ello, se ha elaborado toda una rutina de ensayo tanto para el procedimiento experimental como para el post-procesado, para finalmente exponer una muestra de los resultados obtenidos al trabajar en estas instalaciones.

Este objetivo principal se puede desglosar en objetivos más específicos:

- Pasos a seguir durante el procedimiento experimental.
- Rutina de post-procesado.
- Influencia de la variación del dosado en cuanto a la estabilidad de la llama y la emisión de gases contaminantes.
- Influencia de la cantidad de aire de premezcla suministrado al sistema a la hora de realizar los ensayos.
- Evaluar el efecto de variar la cantidad de masa de aire total.
- El valor de los parámetros más adecuado para la máxima estabilidad de la llama y la mínima emisión de gases contaminantes para el metano.

#### 1.4. Metodología

Una vez con los objetivos en mente, el proyecto se llevó a cabo realizando en primer lugar ensayos en un quemador atmosférico ubicado en las instalaciones del CMT. Se hacían barridos variando diferentes parámetros y se guardaban los datos de las emisiones y las imágenes de las llamas.

Posteriormente, las imágenes tomadas se pasaban por post-procesado en Python para aplicarles filtros y obtener características tales como el ángulo de apertura y la longitud de despegue de la llama.

Finalmente, haciendo uso de las imágenes post-procesadas y de los datos de las emisiones generadas durante la combustión, se realizaba un análisis del comportamiento de las llamas y las emisiones bajo los diferentes valores de los parámetros medidos.



Figura 2: Metodología de trabajo

#### 1.5. Estructura del documento

La memoria ha sido estructurada de tal manera que la primera sección abarcará información sobre el metano y las turbinas de gas para tener cierto conocimiento sobre estos previo a la lectura del resto de la memoria.

En segundo lugar, se detallarán las características de las instalaciones experimentales para, a continuación, explicar el procedimiento experimental seguido durante los ensayos.

Después, una sección será dedica al post-procesado de las imágenes y otra al análisis de los resultados, tanto en términos de estabilización de la llama como en emisiones de contaminantes. Finalmente, se incluirá una conclusión sobre el trabajo realizado.

### 2. Base teórica

#### 2.1. Metano

El metano es el hidrocarburo saturado de cadena más corta que existe. Su fórmula química es  $CH_4$ , en la que cada uno de los átomos de hidrógeno está unido a un átomo de carbono a través de un enlace covalente. se presenta en forma de gas a temperaturas y presiones ordinarias, y se caracteriza por su baja solubilidad en fase líquida y elevada persistencia en la atmósfera.



Figura 3: Formulación orgánica del metano

Se trata de una sustancia que se puede absorber por inhalación, y al hacerlo, puede originar asfixia por la disminución del contenido de oxígeno en el aire, conllevando una pérdida de conocimiento del individuo e incluso de su muerte.

El metano es importante para la generación eléctrica ya que se emplea como combustible en las turbinas de gas y en los generadores de vapor.

Si bien su calor de combustión, de unos 802 kJ/mol, es el menor de todos los hidrocarburos, si se divide por su masa molecular (16 g/mol) se encuentra que el metano, el más simple de los hidrocarburos, produce más cantidad de calor por unidad de masa que otros hidrocarburos más complejos.

En muchas ciudades el metano se transporta en tuberías hasta las casas para ser empleado como combustible para la calefacción y para cocinar. En este contexto se le llama gas natural.

Respecto a su incidencia sobre el medio ambiente, se trata del segundo compuesto que más contribuye al calentamiento global de la tierra (efecto invernadero) con un 15%, sólo superado por el dióxido de carbono con un 76%. No obstante, su combustión es más limpia que otros combustibles, como el carbón o la gasolina refinada a partir del petróleo.

En la combustión del metano al entrar en contacto con el oxígeno genera dióxido de carbono y  $H_2O$ :

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O_2$$

De todas maneras, es urgente la mitigación de los efectos del metano en la atmósfera, pues la mitigación temprana de estos podría resultar en limitar la subida de la temperatura global en 1.5-2 °C.

En la siguiente figura, se puede observar un gráfico comparativo de distintos compuestos y como estos afectan al aumento de temperatura. Es claramente visible como el metano en los primeros años aumentó con significante diferencia la temperatura respecto a los demás compuestos excluyendo al CO2, tras los primeros años su incidencia sobre la temperatura global se ve reducida hasta estar a niveles parecidos al de los demás compuestos.



Figura 4: Impacto de diferentes compuestos sobre la temperatura del planeta

Por otro lado, un estudio reciente estimó que el CH4 contribuye aproximadamente al 35% de la carga actual de O3 de la troposfera. El O3 es un contaminante el cual es responsable de un gran número de enfermedades respiratorias, así como efectos adversos para la salud humana como podría ser el asma o la reducción de la función pulmonar.

Además, la cantidad de metano en la atmósfera ha aumentado más de un 100% en los últimos 200 años, debido en gran parte a la revolución industrial. Los científicos estiman que el metano sea la causa de alrededor de un 20-30% del calentamiento global.



Figura 5: Cantidad de metano en la atmósfera

#### 2.2. Turbina de gas

En el marco del desarrollo de tecnologías más sostenibles y con menor impacto ambiental, cobran especial importancia las turbinas de gas, con numerosas aplicaciones como la generación de energía en centrales eléctrica o en el ámbito aeronáutico. Por tanto, lo resultados obtenidos en este trabajo están enfocados a su futura aplicación en turbinas de gas.

Las centrales de turbina de gas suelen ser más compactas y ligeras que las centrales de ciclo de vapor. Esto las hace menos costosas, y las convierte en una alternativa interesante, además de que el ciclo Brayton, ciclo con el que opera, posee un rendimiento sensiblemente superior al del ciclo de Rankine de vapor de agua. La causa reside en el hecho de que el ciclo Brayton opera a temperaturas mayores que el Rankine.



Figura 6: Ciclo Brayton

La turbina de gas funciona generalmente en base a un ciclo termodinámico abierto, aunque también las hay de ciclo cerrado. Todo comienza con la entrada de aire por la admisión de la turbina, una sección de un área determinado por la cual el flujo de aire entrará para llegar al compresor.

El compresor es un elemento mecánico formado por álabes cuya función principal es la compresión del aire que ha entrado por la admisión. A medida que el aire pasa por las etapas del compresor se reduce el volumen de aire y aumenta su presión hasta que llega a la cámara de combustión.

Este aire comprimido se mezcla con el combustible y se enciende en la cámara de combustión creando un gas caliente en expansión. La cámara de combustión está contenida en una carcasa que soporta la presión proporcionada por el compresor

El gas caliente en expansión impulsará a la turbina generando energía mecánica. Parte de esta energía se usa se usa para accionar el compresor y el resto se usa como potencia útil en el eje.





En el caso de estar haciendo uso de la turbina de gas para propulsar una aeronave o en actividades similares, los gases generados durante la combustión no se expanden del todo en la turbina, sino que, tras esta pasan por la tobera donde se aceleran obteniendo empuje.

Siendo la expresión del empuje:

$$E = (\dot{m}_a + \dot{m}_f)V_9 - \dot{m}_a V_0 + A_9(p_9 - p_0)$$

 $\begin{cases} \dot{m}_a = flujo \ \text{m}\'asico \ de \ aire} \\ \dot{m}_f = flujo \ \text{m}\'asico \ de \ combustible} \\ V_0 = velocidad \ del \ aire \ en \ la \ admisi\'on \\ V_9 = velocidad \ a \ la \ salida \ de \ la \ tobera \end{cases} \begin{cases} A_9 = \ \text{a}\'rea \ de \ salida \ de \ la \ tobera \\ p_0 = presi\'on \ del \ aire \ en \ la \ admisi\'on \\ p_9 = presi\'on \ a \ la \ salida \ de \ la \ tobera \end{cases}$ 

Los ensayos no serán realizados en una turbina de gas, sino que se usará en su lugar un quemador de gas siendo el funcionamiento de este lo más parecido posible a una turbina de gas, aunque las condiciones de trabajo que se darán no serán exactamente iguales pues

en el ámbito aeronáutico las aeronaves vuelan a altitudes altas, donde tanto las condiciones de presión como de temperatura serán diferentes. El quemador de gas tampoco cuenta con un compresor, turbina ni tobera, sino que estará constituido por una cámara de combustión de ciertas dimensiones, que simulará la de una turbina, a la cual llegará el aire a la presión deseada y se producirá la combustión.

## 3. Instalaciones experimentales

### 3.1. Introducción

El presente trabajo trata sobre evaluar de forma experimental la estabilización de la llama, su forma y las emisiones contaminantes al someter el metano a un proceso de combustión premezclada en un quemador atmosférico. Para ello todo un conjunto de instalaciones y aparatos de ensayos son necesarios tanto para la realización efectiva de estos como para la apropiada recogida de datos para un posterior análisis.

A continuación, se puede observar unas imágenes de las instalaciones:



Figura 8: Representación gráfica de las instalaciones



Figura 9: Foto de las instalaciones

Cabe destacar la presencia del quemador (burner), el soplador (blower) y la cámara de alta velocidad, siendo el quemador donde se generan las llamas, la cámara la encargada de hacer fotos de estas para su posterior post-procesado y el soplador el impulsor del aire, es decir empuja el aire para que este llegue hasta el quemador y se pueda realizar la combustión.

El rango operacional del blower es el siguiente:

Flujo másico de aire	0-400 kg/h			
Tabla 1:Flujo másico de aire del soplador				

Más que suficiente para las pruebas realizadas en este estudio donde no se sobrepasarán los 20 kg/h.

### 3.2. Quemador atmosférico

El quemador atmosférico es el eje central del experimento y consta de distintas partes entre las que cabe destacar la cámara de combustión, la cámara de premezcla y los conductos que transportan los flujos de aire entre otros.

El quemador ha sido diseñado para acomodar dos flujos de entrada, uno de aire en remolino y una mezcla de aire-combustible sin remolino, que se introducen en una cámara de mezcla. Al modificar la distribución de la masa de aire en los conductos, el quemador puede producir diferentes llamas las cuales serán evaluadas para poder concluir cual es la óptima desde el punto de vista de las emisiones y la estabilidad.

Adicionalmente, el quemador cuenta con un tubo central que actúa como un cuerpo sólido que ayuda a estabilizar la llama.



Figura 10: Quemador atmosférico

#### 3.3. Conductos

El flujo de aire suministrado al sistema fluirá por distintos conductos, siendo uno de los conductos axial y el otro en remolino (swirling air). El flujo de aire que circula de manera axial es el aire de premezcla, fluirá conjuntamente junto con el combustible que en este caso será metano.

El hecho de tener dos conductos de aire diferentes permitirá no solo poder experimentar cambiando el dosado de la mezcla-combustible, sino también pudiendo cambiar la cantidad de aire suministra por un conducto u otro, permitiendo una mayor cantidad de combinaciones de parámetros de operación para lograr los objetivos propuestos. En la siguiente figura podemos observar un esquema de los conductos de aire:



Figura 11: Representación de los conductos



Figura 12: Swirler

Es claramente observable dos conductos diferenciados siendo el conducto con flechas rojas el del aire-combustible y el de las flechas verdes el del swirler (remolino).

El flujo de la mezcla aire-combustible fluirá a través de un tubo central axial que conducirá hasta una cámara de premezcla, mientras que el aire del swirler fluirá alrededor del tubo central hasta llegar también a la cámara de premezcla, donde ambos flujos se mezclarán y finalmente serán conducidos a la cámara de combustión.

#### 3.3.1. Estabilización de la llama

La implementación de un conducto en remolino tiene como objetivo otorgar mayor estabilización a la llama y es que la velocidad de propagación de llama es muy baja en combustión laminar, siendo del orden de 10-50 cm/s.

La llama se estabiliza cuando la velocidad de propagación de esta es igual y contraria a la componente normal a la llama del flujo de reactantes. Esto implica que debido a las bajas velocidades de propagación serán necesarias secciones de paso y quemadores de dimensiones superiores si se emplea como inyector un chorro premezclado tradicional. En la práctica, lo que interesa es quemar grandes cantidades de combustible en un espacio reducido, por tanto, se debe buscar la manera de aumentar la velocidad y encontrar la manera de estabilizar la llama a velocidades mayores. Esto se puede conseguir mediante distintas técnicas: en flujo cruzado, en contracorriente, utilizando cuerpos estabilizadores...

En el caso de este proyecto se implementó el chorro con giro. El flujo con giro se caracteriza por la superposición de la velocidad axial del chorro y una componente tangencial, resultando en un movimiento en espiral. Bajo estas condiciones, se genera una fuerza centrípeta la cual causa que aparezca un gradiente radial de presión, lo cual engendra succión en el centro y sobrepresión en las paredes. Al salir este flujo del inyector el chorro tiende a abrirse. Esta tendencia puede originar tanta succión en el centro que atrae a fluido de las regiones corriente abajo y se crea un punto de estancamiento en el seno del flujo, apareciendo una zona de recirculación: es el fenómeno de rotura de vórtice. Esta recirculación sirve para estabilizar una llama y poder quemar una mayor cantidad de combustible sin necesidad de aumentar la sección de paso de los flujos de aire y combustible.

#### 3.4. Cámara de combustión

En un proceso de combustión interna, la cámara de combustión es donde se realiza la combustión del combustible con el comburente, en este caso metano con aire, con ayuda de la chispa.

En el caso de la combustión premezclada, la mezcla de aire y combustible se hace en una cámara de premezcla, donde tras haberse mezclado pasarán a la cámara de combustión.



Figura 13: Cámara de combustión



Figura 14: Foto de la cámara de combustión

La cámara de combustión consiste en una plataforma cuadrada con un orificio en la parte central de este donde está ubicado el tubo de donde saldrá la mezcla de aire y combustible. Además, cuenta con paredes alrededor siendo dos de ellas de cuarzo para poder tomar las fotos y las otras dos de metal. Una de estas paredes cuenta con un orificio donde se coloca el generador de chispa que hará combustionar la mezcla y generar la llama a estudiar.



Figura 15: Generador de chispa

#### 3.5. Equipamiento experimental



Figura 16: Equipamiento experimental

El swirler de 60° tiene un diámetro exterior de 20 mm y un diámetro interior de 12 mm, mientras que el conducto axial tiene un diámetro exterior de 9 mm y un diámetro interior de 6 mm. Lo que hace que el conducto con forma de remolino tengo una mayor sección transversal que el axial.



Swirler 60°

Figura 17: Swirler 60°

El tubo central que separa estas corrientes tiene un diámetro exterior de 6 mm.

La cámara de premezcla tiene un diámetro exterior de 10 mm y posee una longitud de 70 mm.

$$S_{mixing\_chamber} = \pi \cdot \frac{D^2}{4} = 78.53 \ mm^2$$

La cámara de combustión tiene una sección transversal cuadrada de 100 mm de lado y 281 mm de altura, siendo por ende de un tamaño bastante superior a la cámara de premezcla.

$$S_{combustion \ chamber} = l^2 = 4900 \ mm^2$$

	Diámetro interior [mm]	Diámetro exterior [mm]
Swirling	6	9
Conducto axial	12	20
Tubo central	4	6
	Tabla 2: Medidas I	

	Área sección transversal [mm^2]	Longitud[mm]
Cámara de combustión	4900	180
Cámara de mezcla	78.53	70

Tabla 3: Medidas II

#### 3.6. Parámetros de operación

Las diferentes condiciones de operación bajo las cuales operará el quemador se son el flujo másico total de aire ( $\dot{m}_a$ ), la relación de equivalencia global ( $\phi$ ), que se refiere a la proporción de la mezcla de combustible y aire en relación con la proporción estequiométrica, y la proporción de aire de premezcla AP.

#### 3.6.1. *m*<sub>a</sub>

Como bien sabido es, el quemador atmósferico necesita de aire para poder funcionar ya que es el comburente que se usa en la combustión del metano y el hidrógeno.

La cantidad total del aire (tanto del swirling  $(\dot{m}_{a,S})$  como el de premezcla  $(\dot{m}_{a,p})$ ) y del combustible  $(\dot{m}_f)$  se pueden controlar para poder hacer distintas pruebas bajo diferentes condiciones de operación, lo cual se hace mediante los flujómetros instalados en el quemador y programas informáticos.

La masa total de aire suministrada se expresará como la suma de las masas del aire del swirling y el aire de premezcla:

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{a,S} + \dot{m}_{a,p}$$

#### 3.6.2. *φ*

El dosado es la relación entre la masa de aire y la de un combustible sólido, líquido o gaseoso presente en un proceso de combustión. Es decir, nos da la información sobre la proporción de aire y combustible presentes en una mezcla de estos:

$$F = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a}$$

Por otro lado, es importante definir el concepto de dosado estequiométrico, y es la proporción exacta de aire y combustible necesaria para que la combustión sea completa, es decir, para que todo el combustible reaccione con todo el oxígeno disponible sin que quede un exceso de ninguno de los dos.
En otras palabras, es la relación ideal entre la masa de aire y la masa de combustible que permite que la reacción química de la combustión consuma todo el combustible y todo el aire.

Tras haber quedado claros estos conceptos, el parámetro  $\phi$  se define como la relación entre el flujo másico de combustible y de aire respecto de la relación estequiométrica de estos, por tanto, si este valor es igual a 1 significa que estamos en dosado estequiométrico, estando por encima nos encontraríamos antes una mezcla rica (exceso de combustible) y estando por debajo de 1 se hablaría de una mezcla pobre (exceso de aire).

$$\phi = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_{a,S} + \dot{m}_{a,p}} AF_{st}$$

AF<sub>st</sub> representa la relación estequiométrica de aire a combustible.

Al trabajar con dosados ricos la combustión es incompleta o parcial. Por otro lado, con dosados pobres el proceso de oxidación puede llegar a ser prácticamente completo.

#### 3.6.3. AP

El parámetro AP indica cómo se distribuye el aire entre el aire de premezcla y el aire del swirler. La proporción de aire de premezcla es fundamental para asegurar una combustión eficiente y estable, ya que una distribución adecuada puede influir significativamente en la estabilidad de la llama, la formación de contaminantes y la eficiencia general del proceso de combustión.

$$AP = \frac{\dot{m}_{a,p}}{\dot{m}_{a,S} + \dot{m}_{a,p}}$$

La experimentación con diferentes valores de estos parámetros y su registro es de vital importancia para poder concluir que combinaciones son las más eficientes en términos de reducción de emisiones y bajo qué condiciones hay apagado de llama o ni siquiera encendido.

## 3.7. Termopares

La medición y registro de las temperaturas es de vital importancia pues el correcto desarrollo de los ensayos depende de estas. Para ello, el quemador cuenta con diferentes termopares para medir las temperaturas, las cuales, se podrán visualiar y guardar mediante el programa Burner.



Figura 18: Termopar

En la siguiente figura podemos observar un esquema de la dispoción de los distintos termopares y la designación de cada uno de ellos para poder identificarlos en el programa.



Figura 19: Ubicación de los termopares

El llevar un registro de las temperaturas también es importante pues si son demasiado altas harían inservibles ciertas configuraciones de llama para ciertas actividades.

## 3.8. Aparatos de medición de emisiones

Los gases de escape son clave para medir las emisiones contaminantes generados durante la combustión como pueden ser CO, CO2, NO, NOx, NO2 e hidrocarburos sin quemar. La medida de estos contaminantes se realiza con dos aparatos de medida: Testo y Horiba OBS-ONE.

El Horiba OBS-ONE es un avanzado sistema de análisis de gases de escape diseñado para medir y analizar las emisiones contaminantes de vehículos y motores en condiciones reales de operación. Este dispositivo es utilizado principalmente en pruebas de emisiones para cumplir con las normativas medioambientales y para el desarrollo y optimización de tecnologías de control de emisiones. Es capaz de medir la concentración de CO, CO2, NO, NOx, NO2 e hidrocarburos sin quemar.

El testo es otro instrumento de medición de emisiones, pero a diferencia del Horiba OBS-ONE, este no es capaz de detectar los hidrocarburos sin quemar.

Haremos uso de ambos, el Horiba para la medición de todos los gases contaminantes anteriormente mencionados a excepción del NO, cuyas medidas serán extraídas de los datos recogidos por el Testo.

Con un tubo instalado en la zona superior de la cámara de combustión se recogerá la muestra de los gases quemados que serán conducidos hasta los aparatos de medición donde se realizará el muestreo de las emisiones.

# 4. Procedimiento experimental

## 4.1. Introducción

Previo analizar los resultados obtenidos en ellos ensayos experimentales que se realizaron en el CMT, es preciso describir como se llevaron a cabo estos, bajo qué condiciones y con que precauciones. Serán detallados en primer lugar los pasos preliminares necesarios para el correcto desarrollo de las pruebas experimentales, para a continuación explicar el plan de ensayos dividido en una serie de pasos documentados que se seguía a la hora de realizar los ensayos y sus correspondientes recogidas de datos.

El seguimiento de las pautas expuestas a continuación es crucial para el correcto desarrollo de cada una de las pruebas realizadas en el laboratorio y alcanzar los objetivos propuestos de manera satisfactoria.

## 4.2. Pasos preliminares

Antes de comenzar con la rutina de ensayos se deben de realizar una seria de tareas, sin la cuales, no se puede medir.

En primer lugar, hay q comprobar que haya corriente en la sala de pruebas, pues durante el desarrollo de las pruebas se hace uso de diversos aparatos de medida, ordenadores y cámaras que necesitan de corriente eléctrica para poder funcionar.

También hay que comprobar los depósitos de combustible y que queda combustible suficiente en ellos para realizar las mediciones. También comprobar que el depósito de combustible corresponde con el tipo de combustible requerido para los ensayos.

Seguidamente, se comprueba que el conducto de aire está abierto, en caso de no estarlo, abrirlo, pues el aire toma el papel de comburente y sin él no es posible llevar a cabo la experimentación.

A continuación, se enciende el PLC mediante una manilla roja que se encuentra en la parte trasera de este. El PLC es un aparato instalado en la sala de pruebas el cual controla el flujo de aire total ( $\dot{m}_a$ ).



Figura 20: PLC

Encender la fuente de alimentación del flujo de aire secundario y la fuente de alimentación del flujo de metano o de hidrógeno en función del combustible que se vaya a usar para la prueba. Abrir el cilindro de metano o de hidrógeno hasta alcanzar una presión de 2 bares (no exceder los 16 bares, que es la presión máxima del medidor de flujo de metano). Tras esto, encender cualquier otro aparato electrónico en la sala, colocar la chispa en su lugar correspondiente y abandonar la sala.

A continuación, se hace uso de los ordenadores que se encuentran fuera de la sala para abrir una serie de programas informáticos vitales tanto para el control de las condiciones de operación de la prueba como para la recogida de datos. Estos programas son FlowDDE, Burner y FlowView.

En el programa Burner hay que verificar que la dirección IP está correctamente configurada (169.154.111.111). Además, antes del inicio de las pruebas hay que hacer click en RESET y asegurarse de que la luz roja en el PLC está apagada y la luz verde encendida. Por último, se configuran los parámetros PID en el programa del quemador (P: 0.8, I: 0.1, D: 0.001).

El programa recoge las medidas de las temperaturas de los termopares además de que en este programa se impone el flujo de aire total.

Ahora, se abre el programa FlowDDE, se hace click en "Communication" y después en "Open Comunication". Seguidamente, se abre el programa FlowView. Cabe mencionar que deben abrirse dos programas FlowView, cada uno en un ordenador diferente, uno para controlar el flujo de combustible y otro para controlar el flujo de aire del swirling.

Una vez que se abra el FlowView se hace click en "Advanced" y luego en Setpoint/Control Mode se selecciona la opción de RS232.

Comprobar que el botón de seguridad está correctamente conectado y que está en OFF. Este botón permite abrir o cerrar el conducto por el cual fluye el combustible.

También cerciorarse los medidores de gases de escape HORIBA OBS-ONE y Testo están correctamente conectados y configurados.

Finalmente, comprobar que no hay nadie en la sala, apagar las luces y encender el extractor 3.

## 4.3. Plan de ensayos

Una vez realizadas las pautas anteriores, se procederá finalmente a la realización de las pruebas.

En primer lugar, haciendo uso del programa Burner se impondrá el flujo de aire que corresponde a la prueba y se verificará el valor de la cantidad de flujo másico total de aire que mide el Burner con el que mide el PLC y en caso de haber alguna diferencia significativa se corregirá el desfase.

De manera análoga, se impondrán los valores del flujo de aire del swirling y del flujo de combustible en el FlowView.

En caso de que el punto de operación requiera de mucha potencia se impondrán valores de baja potencia a los flujos de airea y combustible y se encenderá la llama en ese punto, para posteriormente ir aumentado los valores de estos de manera gradual hasta llegar a los valores requeridos por la prueba. En caso de que no requiera de mucha potencia, simplemente se procederá al encendido de la llama directamente en ese punto.

Ahora, se comprobará que hay chispa, si esta funciona, se encenderá y se pulsará el botón de seguridad para que esté en ON y fluya combustible a la cámara de combustión. Si la llama enciende se apaga la chispa y se retirará esta para insertar un tapón metálico en el orificio que queda descubierto. Por seguridad, se usan guantes aislantes de temperatura.

Como hemos comentado antes, si el punto requería de mucha potencia se procedía al encendido de la llama desde un punto de baja potencia. Si este es el caso, una vez encendida la llama se aumentarán los flujos de aire y combustible pero controlando en todo momento que se mantiene en un dosado estequiométrico.

Para poder movernos del punto de encendido al punto de la primera medición se hará uso de un Excel en el cual insertando los valores de flujo de aire y combustible se puede saber a qué dosado se encuentra la mezcla para poder cerciorarnos de que la mezcla de airecombustible se encuentra en todo momento en dosado estequiométrico.

	0.00129
phi	1.14
fuel g/h	756
Total Air In/m	147.3
Total Air kg/h	11.4
Afst	17.190
LHV[kWh/kg]	13.900
[kW]	10.508

Figura 21: Excel para punto de encendido

Una vez alcanzado el primer punto de la serie de puntos que serán medidos se procederá a la recogida de datos.

Haciendo uso del programa Burner se comprobará que T4 está estabilizada, cuando esta lo esté se pueden guardar los datos haciendo click en "Save Data". Además, también serán recogidos los datos de las emisiones del HORIBA OBS-ONE y el Testo. En el caso del Horiba, fuera de la sala se encuentra un ordenador con los datos de las emisiones de CO2, CO, NOx, NO, NO2 e hidrocarburos sin quemar. Para el Testo, una persona deberá entrar a la sala y recoger los datos mostrados en el aparato.

Tras haber recogido los datos, se cambiarán las condiciones de operación y se pasará al siguiente punto, de un dosado más pobre, y de nuevo cuando se vuelva a estabilizar T4 se recogerán los datos de este nuevo punto.

De manera simultánea, la cámara tomará imágenes de la llama para guardarlas y poder ser posteriormente analizadas.



Figura 22: Llama

Este proceso será repetido con todos los puntos hasta que la llama se apague. Una vez la llama se apague se pulsará rápidamente el botón de seguridad para cortar el flujo de combustible y se impondrá un flujo de aire alto para enfriar el quemador lo antes posible.

Una vez el quemador tenga una T4 de alrededor de 100°C se podrá proseguir con la siguiente prueba.

Se pueden producir tres tipos de apagado: hot pilot, blow off y flash back.

El apagado por hot pilot es cuando el tubo se calienta demasiado y se debe cancelar la prueba. Por tanto, más bien sería un apagado forzado ya que el personal que esté realizando el ensayo será quienes apaguen la llama debido al aumento de temperatura del tubo.

Por otro lado, el apagado por blow off se produce porque la velocidad del flujo de la mezcla de aire y combustible supera la velocidad de propagación de la llama, lo que hace que la llame se apague. Cuando ocurra este tipo de apagado se observará una separación excesiva de la llama del tubo.



Por último, el apagado por flashback ocurre cuando la llama se propaga hacia atrás en el flujo de la mezcla aire-combustible, ingresando al quemador o al sistema de alimentación de la mezcla. Esto sucede cuando la velocidad de propagación de la llama es mayor que la velocidad de la mezcla que sale del quemador.

### 4.3.1. Advertencias

Siempre de debe verificar la presencia de la llama. Si no hay llama, se presiona el interruptor de seguridad hacia la posición "OFF". Después de presionar el interruptor de seguridad, reducir el flujo de combustible en el software FlowView a cero.

Verifica que la temperatura del aire en el soplador no exceda los 35°C, ya que el soplador está bajo presión debido a la resistencia al flujo de las válvulas de control, lo que puede provocar sobrecalentamiento y daños.

# 5. Post-procesado

## 5.1. Introducción

Una vez realizados los ensayos de los barridos de condiciones escogidos y habiendo registrado las imágenes de las llamas durante estos se procederá al post-procesado de las imágenes para poder analizar la forma y estructura de la llama.

El código Python del que se hace uso para post-procesar las imágenes ha sido desarrollado en el softwarte Spyder 5.4.3, el cual, tras haber procesado las imágenes, generará una imagen que es un promediado de las imágenes que la cámara realizó de esa llama además de darnos información sobre su ángulo de apertura y la altura a la que se produce el despegue de la llama.

## 5.2. Rutina de post-procesado

Las imágenes tomadas por la cámara son guardadas en un archivo .sif, y cada archivo .sif se ubicará en la carpeta correspondiente a su prueba en concreto. Por ejemplo, el ensayo con valores de  $\phi = 1$ , AP = 0 y  $\dot{m}_a = 12kg/s$  correspondería al ensayo número 343 por tanto su correspondiente archivo .sif se ubicaría en la carpeta de nombre 343\_a12\_phi1\_pa0\_h0\_s60.

Al hacer click en run el código se ejecutará y aparecerá el siguiente mensaje en la consola:



Figura 24: Opciones post-procesado

Se escribe 1 para procesar los datos en primer lugar y se indicará el número de prueba. El programa acudirá a la carpeta en cuestión y procesará el archivo .sif para crear otro un nuevo archivo .dat.

Tras esto se escoge la opción 2 la cual generará las imágenes de la llama ya procesadas.

Las imágenes son un promediado de otras imagénes hechas por la cámara, es decir, el resultado del post-procesado genera una imagen que resulta de promediar un gran número de imágenes tomadas por la cámara y a la que se le aplican filtros.



Figura 25: Imagen post-procesada

Se pasará de tener imágenes instantáneas como la de la izquierda a un promedio de imágenes de la llama con un filtro aplicado donde se podrá observar con claridad su forma.

Todas las imágenes generadas por el programa de post-procesado aparecerán en sus carpetas de datos correspondientes.

# 5.3. Longitud de despegue (Lift-off length) y ángulo de apertura de la llama

Para un estudio más preciso de las llamas, se introdujo en el código el cálculo del ángulo de apertura de la llama ( $\alpha$ ) y la longitud de despegue (Lift-off length).



#### Figura 26: Alfa y Lift-off length

El ángulo de apartura de la llama y el lift-off length (LoL) son dos parámetros de especial relevancia y utilidad pues se usarán para estudiar la estructura de las llamas generadas por la combustión y se analizará como varía su valor al variar AP,  $\dot{m}_a$  y el dosado.

El cálculo de esos dos parámetros se ha automatizado en el código Python del que disponemos para realizar el post-procesado de las imágenes. En primer lugar, se calcula el lift-off length y tras obtener este se calcula el ángulo alfa.

Lift-off length es la línea horizontal que define la zona a partir de la cual la llama tiene un 15% o más de la intensidad máxima.

El proceso consiste en que el programa va analizando línea por línea la imagen tomada, comenzado desde abajo, al detectar un píxel cuya intensidad sea  $I = 0.15 \cdot I_{MAX}$  trazará una línea horizontal definiendo de esta manera el lift-off length. El programa nos dará la altura a la que este se encuentra entre un rango de 0 a 975, siendo 975 "altura 0" y 0 la máxima altura. Esto es debido a que las imágenes tienen un tamaño de 1000 x 975 píxeles.

Además, el litf off también será de especial importancia a la hora de efectuar el cálculo del ángulo de apertura de la llama ( $\alpha$ ). El ángulo  $\alpha$  de la llama es el ángulo resultante de traza dos líneas que cruzan desde el origen por los puntos del lift-off length en los cuales la intensidad lúminica de la llama comienza a ser un 15% o más de la intensidad máxima.



Figura 27: Cálculo del ángulo de apertura

Con el código Python del que disponemos para realizar el post-procesado obtendremos la altura del LoL y las distancias x1 y x2 que serán las distancias que van desde el origen ubicado en el centro a los puntos ubicados en el LoL hasta donde comienza a haber una intensidad equivalente al 15% de la intensidad máxima.

Teniendo esos datos podremos calcular el ángulo de la llama de la siguiente manera:

$$\begin{cases} \tan \beta_1 = \frac{LoL}{x_1} \\ \tan \beta_2 = \frac{LoL}{x_2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \beta_1 = \tan^{-1} \frac{LoL}{x_1} \\ \beta_2 = \tan^{-1} \frac{LoL}{x_2} \end{cases} \rightarrow \alpha = 180 - \beta_1 - \beta_2 \end{cases}$$

# 6. Análisis de resultados

# 6.1. Introducción

En este apartado se va a proceder a la presentación y análisis de los resultados obtenidos tras someter a post-procesado las imágenes tomadas durante los ensayos en el laboratorio teniendo en cuenta los cambios producidos en las llamas y sus características al varias los 3 parámetros clave del estudio, la masa total de aire, la proporción de aire de premezcla y el dosado de la mezcla combustible-aire. Además, también se someterá a análisis los datos obtenidos de medir las emisiones contaminantes al realizar estos ensayos.

# 6.2. Análisis de la estabilidad y la estructura de la llama (AP = 0%)

Para este primer análisis, se ha procedido a usar un barrido de datos pertenecientes a ensayos con un mismo valor de AP, en este caso de 0%, donde los parámetros que varían son  $\Phi$  y la masa total de aire suministrada al sistema.

Cuando se usa CH4 en el quemador no es posible operarlo a alto caudal de aire, debido a que ocurre apagado por blow off, por eso la toma de muestras se realiza a caudales de aire inferiores a 20 kg/h.



Figura 28: Imágenes post-procesadas para el barrido de datos AP = 0%

Tras haber post-procesado los datos en Python y obtenido las imágenes con sus correspondientes ángulos y LoL se han ordenado de tal manera que se pueda observar el cambio visualmente al cambiar el dosado o la masa de aire.

Hay ciertas configuraciones de parámetros de las cuales no existen imágenes pues el ensayo debía de cancelarse debido al apagado de estas, en este caso apagado forzado debido a un excesivo aumento de la temperatura del tubo piloto.

Para AP=0%, las imágenes muestran que las llaman están ancladas al tubo piloto formando una especie de triángulo invertido, además, de que a medida que el dosado decrece la llama se ve aún más anclada al tubo lo que explica los apagados por "hot pilot" al empobrecer la mezcla, aunque este apagado se da más tarde para flujos másicos de aire de 15 y 18 kg/h. De esta manera a medida que se aumenta la masa de aire total suministrada al sistema la llama se formará más alejada del tubo, aumentado las posibilidades de apagado por blow off.

Número de prueba	AP	$\dot{m}_a[kg/h]$	Φ[-]	α [°]	Apagado	LoL
1	0	12	1	152.12		851
2	0	12	0.95		Hot pilot	
3	0	13	1	158.02		878
4	0	13	0.95		Hot pilot	
5	0	15	1	141.38		800
6	0	15	0.95	163.37		902
7	0	15	0.9		Hot pilot	
8	0	18	1	126.82		725
9	0	18	0.9	155.38		866
10	0	18	0.85		Hot pilot	

Tabla 4: Barrido ensayos AP = 0%

Tras tener todos los datos ordenados y en tablas se ha procedido a graficarlos para observar la tendencia de las llamas al variar el dosado y  $\dot{m}_a$  manteniendo constante el valor de AP.



Figura 29:Ángulo de apertura en función de ma

En primer lugar, se ha graficado la relación entre la masa de aire total y el ángulo de la llama para un dosado igual a la unidad y un AP = 0 para poder observar la relación entre la variación de la masa de aire y el ángulo resultante. En términos generales se puede extraer que el ángulo de la llama generada por la combustión del metano será menor cuando más grande sea la cantidad de aire total suministrada.



Figura 30: Ángulo de apertura en función del dosado

Por otro lado, si mantenemos constante tanto la masa de aire como el AP, se puede observar una disminución del ángulo al aumentar el dosado de la mezcla airecombustible, tal y como refleja la gráfica para una masa de aire de 15 y 18 kg/h. Por tanto, se puede concluir a partir de este primer análisis que a mayor  $\dot{m}_a$  y mayor dosado menor será el ángulo de la llama.

En cuanto al LoL sigue una tendencia contraria al ángulo de apertura de las llamas, y es que para un mismo dosado este se encuentra a una altura menor al pasar de una masa de aire de 12 kg/h a 13 kg/h para posteriormente aumentar gradualmente conforme aumenta la masa de aire a 15 y 18 kg/h, por lo que en términos generales se puede decir que la altura a la que se encontrará el lift-off aumentará con la cantidad de masa de aire suministrada al sistema.

También se puede observar como para una misma cantidad de masa de aire la altura a la que se encontrará el lift-off será menor si el dosado decrece, esto debido a que cuando se trabaja con dosados más pequeños manteniendo la misma masa de aire total la llama estará más pegada al tubo de salida.

# 6.3. Análisis de la estabilidad y la estructura de la llama ( $\dot{m}_a = 13 kg/h$ )

Al igual que como se ha realizado anteriormente se procederá al análisis de otra pila de datos, pero esta vez de datos cuyo valor de masa de aire total se mantendrá constante para todos los ensayos y que será de 13 kg/h.

Se realizaron los ensayos para valores de AP desde 0% a 15% y  $\phi$  desde 1 hasta 0.7.

De nuevo, tras haber realizado el post-procesado de los datos en Python y obtenido las imágenes con sus correspondientes ángulos y LoL, se han ordenado las imágenes de manera análoga a como se hizo con anterioridad para observar visualmente como las llamas cambian en función de la variación del dosado y de AP.



Figura 31: Imágenes post-procesadas para el barrido de datos ma = 13 kg/h

De nuevo, habrá ciertas configuraciones para las cuales no habrá imágenes debido a apagado, en este caso serán por una excesiva temperatura del tubo piloto y por blow off.

A medida que el AP aumenta, la llama gozará de una estabilidad mayor ante la variación de dosados, pues mientras que para AP = 0% y AP = 5% solo hay llama a dosado estequiométrico, AP = 15% abarca un rango de dosados más amplio llegando hasta un dosado = 0.8.

Mientras que para AP = 0% se mostraba un anclaje de la llama bastante evidente, a medida que este valor aumenta se va a producir un "desanclaje" de la llama del piloto, siendo esto

más evidente para AP= 10% y 15% donde además se observa un achatamiento de llama, perdiendo la forma de triángulo invertido que poseía anteriormente.







Figura 32: Achatamiento de la llama

Número		[1 (1]		507		
de prueba	AP	$m_a[kg/h]$	$\Phi[-]$	α [°]	Apagado	LoL
11	5	13	1	131.12		748
12	5	13	0.95		Hot pilot	
13	10	13	1	145.94		822
14	10	13	0.9	149.75		840
15	10	13	0.85	177.94		966
16	10	13	0.8		Hot pilot	
17	15	13	1	147.41		829
18	15	13	0.9	148.47		834
19	15	13	0.8	174.50		951
20	15	13	0.7		Blowoff	

Tabla 5: Barrido ensayos ma = 13 kg/h



Figura 33: Ángulo de apertura en función del AP

En primer lugar, se observa una clara tendencia en la que aumenta alfa al aumentar el aire de premezcla si mantenemos constante el dosado y la masa de aire total, en este caso con un dosado igual a la unidad y una masa de aire de 13 kg/h.



Figura 34: Ángulo de apertura en función del dosado II

Y al igual que en la pila de datos anteriormente analizada se vuelve a experimentar una disminución de alfa al aumentar el dosado de la mezcla.

En cuanto al lift-off observamos que al aumentar la masa de aire total la altura a la que se dará el lift-off disminuirá.

De igual manera, la altura del lift-off también disminuirá al reducir el dosado de la mezcla.

Por tanto, en términos generales y tras haber analizado dos pilas de datos se podrá concluir que el ángulo que formará la llama de metano en combustión premezclada aumentará si AP aumenta o disminuyen el dosado y la masa de aire total.

Por otro lado, la altura del lift-off será mayor si aumenta la masa de aire total y el dosado o disminuye el AP.

Las conclusiones extraídas analizando ambas pilas de datos concuerdan perfectamente y no son contradictorias lo que podría ser reflejo de un análisis realizado de manera correcta.

Las condiciones bajo las cuales se produce apagado se han registrado y ordenado en una tabla con el objetivo de conocer bajo que combinaciones de los parámetros de operación no se debe trabajar:

AP	$m_a[kg/h]$	Φ
0	12	0.95
0	15	0.9
0	18	0.85
0	13	0.95
5	13	0.95
10	13	0.8
15	13	0.7

Tabla 6: Puntos de apagado

Todas experimentan apagado por "hot pilot" a excepción de la última configuración que es por blow off producido por lo pobre que es la mezcla aire-combustible. Básicamente, si se quiere tener llama hay que tener un AP lo más alto posible (teniendo como límite AP = 20%) y un flujo másico de aire total lo más alto posible (teniendo como límite ma = 20 kg/g) pues nos permitirá poder operar en un rango más amplio de dosados, mientras que para AP y ma bajos se debe operar en dosado estequiométrico o muy cercano a él para poder tener llama.

### 6.4. Emisiones de NO

Las emisiones de NO son un tipo de contaminante atmosférico que proviene principalmente de actividades humanas, como la combustión de combustibles fósiles, y que tiene importantes efectos adversos sobre la atmósfera y la salud humana. El NO se forma cuando el nitrógeno y el oxígeno presentes en el aire reaccionan a altas temperaturas en procesos de combustión, tendiendo a generarse una mayor cantidad de NO a medida que las temperaturas ascienden. Por tanto, la formación de NO depende directamente de la configuración de parámetros que se use a la hora de combustionar el metano.

Para poder extraer una tendencia al aumento o reducción de las emisiones se usarán los datos recogidos por el Testo referentes a las emisiones de NO y se observará su variación antes distintos valores de los parámetros de operación.

Acudiendo a los datos recogidos por el testo se procederá a graficar la evolución de las emisiones de NO en función de  $\phi$  con diferentes valores de AP y  $\dot{m}_a$ .

	$\dot{m}_a$ [kg/h]	$\phi[-]$	AP[%]
Rango de valores	12-15-18	[0.6,1]	[0,20]

Tabla 7: Rango de valores



Figura 35: Emisiones NO

Se puede observar una tendencia en la cual las emisiones de NO crecen a medida que aumenta el valor de  $\phi$ . Esto es debido a que las emisiones de NO están controladas por un mecanismo térmico mediante el cual cuando nos acercamos a dosado estequiométrico, suben las temperaturas de llama, resultando en un aumento de las emisiones de NO durante la combustión

También es posible extraer de estas gráficas que estas emisiones aumentan también al aumentar el valor de AP, pues los picos máximos de emisiones para un mismo flujo de aire total se dan para el máximo AP con el que se realizaron las mediciones para ese flujo en concreto y a  $\phi = 1$ .

Las emisiones de NO se ven minimizadas al operar con  $\begin{cases} \dot{m}_a = 18 \ kg/h \\ \phi = 0.6 \\ AP = 10\% \end{cases}$ , esto debido a

que es la configuración con el dosado más alejado del estequiométrico, derivando en menores temperaturas durante la combustión y por tanto menores emisiones de NO.

# 7. Conclusiones

El presente trabajo ha presentado la metodología seguida durante el desarrollo experimental del proyecto de la caracterización experimental del proceso de combustión en un quemador gaseoso atmosférico, así como una evaluación experimental de la estabilización de la llama y sus emisiones contaminantes. El estudio fue realizado con metano, con visión a futuro de realizar ensayos con hidrógeno.

La metodología estuvo basada en la realización de ensayos en las instalaciones del CMT, en los que se llevaban a cabo procesos de combustión premezclada usando metano, aire de premezcla fluyendo a través de un conducto axial y otro flujo de aire el cual fluía por un conducto en remolino, este último fue añadido para estudiar el comportamiento de la llama al variar la cantidad de aire del swirler. Los ensayos se realizaban variando el dosado, la cantidad de aire total y el aire de premezcla registrando las emisiones contaminantes generadas durante la combustión y fotografiando las llamas.

Una vez que estos ensayos eran finalizados, se pasaba a la fase de post-procesado donde las imágenes tomadas durante el procedimiento experimental eran procesadas por un programa para obtener información sobre su estructura y posteriormente analizarlas.

A continuación, un análisis de las imágenes post-procesadas así como de las emisiones de NO fue realizado. De este análisis de pudo extraer que las llamas de metano formadas por un proceso de combustión premezclada en un quemador atmosférico con swirler serán más estables al aumentar el valor de AP, siendo el valor para el que la llama tuvo más estabilidad el mayor con el que se realizaron ensayos, AP = 15%, donde se pudo operar en dosados alejados del estequiométrico, además de no poseer alturas de despegue ni muy altas, evitando apagado por blow off, a no ser que se trabaje en dosado muy pobre, ni alturas de despegue muy bajas, evitando el calentamiento extremo del tubo piloto.

Además, el trabajar lejos del dosado estequiométrico, algo que es posible a AP de 10-15 %, también se reducen las emisiones de NO debido a la disminución de las temperaturas de trabajo.

Por tanto, se puede afirmar con total certeza que la inclusión de un swirler en un quemador atmosférico es beneficioso tanto en términos de estabilidad de la llama como en reducción de emisiones de NO.

Finalmente, cabe recalcar que este trabajo es solo una parte de un proyecto mucho más extenso, habiendo sido mi papel en esta parte del proyecto establecer una rutina de ensayos y post-procesado, así como la colaboración en parte de la experimentación con el metano bajo ciertas condiciones. La visión a futuro respecto a este proyecto es continuar experimentando con metano, pero con otros valores de los parámetros de operación, para después, realizar ensayos con hidrógeno como combustible y estudiar las características y el impacto que supondría una transición hacia este combustible más verde, en materia de emisiones contaminantes y en estabilidad de la llama.

# 8. Bibliografía

Experimental evaluation of a premixed swirl-stabilized gas burner with a focus on mixture stratification. Raul Payri, José M. García-Oliver, Pedro Martí Gómez-Aldaraví, Elkin Ramírez-Correa.

Gas turbine combustion research at CMT-Clean Mobility & Thermofluids.

Estudio y caracterización de un quemador estabilizado por giro, Tesis doctoral. Mathieu Legrand.

Atmospheric low swirl burner flow characterization with stereo PIV. Mathieu Legrand, José Nogueira, Antonio Lecuona, Sara Nauri, Pedro A. Rodríguez.

ODS. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/

Horiba OBS-ONE.

https://www.horiba.com/esp/automotive/products/detail/action/show/Product/obs-onegs-unit-28/

Beyond CO<sub>2</sub> equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health. Kathleen A. Mar, Charlotte Unger, Ludmila Walderdorff, Tim Butler. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1462901122001204#bbib82

Global trends of methane emissions and their impacts on ozone concentrations. Van Dingenen, R., Crippa, M., Maenhout, G., Guizzardi, D., Dentener, F.

A global review of methane policies reveals that only 13% of emissions are covered with unclear effectiveness. Maria Olczak, Andris Piebalgs, Paul Balcombe. <u>https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590332223001951</u>

Methane. <u>https://climate.nasa.gov/vital-</u> signs/methane/?intent=121#:~:text=The%20concentration%20of%20methane%20in,(w hich%20began%20in%201750).

Ciclo Brayton. https://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo\_Brayton

Methane emissions are predominantly responsible for record-breaking atmospheric methane growth rates in 2020 and 2021. Liang Feng, Paul I. Palmer, Robert J. Parker, Mark F. Lunt, and Hartmut Bösch. <u>https://acp.copernicus.org/articles/23/4863/2023/acp-23-4863-2023.html</u>

Global methane emissions from rivers and streams. Gerard Rocher-Ros, Emily H. Stanley, Luke C. Loken, Nora J. Casson, Peter A. Raymond, Shaoda Liu, Giuseppe Amatulli & Ryan A. Sponseller. <u>https://www.nature.com/articles/s41586-023-06344-6</u>

Experimental and numerical investigation of methane combustion in a HCCI engine under enriched oxygen conditions. S. Spanò, M. Savarese, A. Parente, F. Contino, H. Jeanmart. <u>https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236123033860</u>

Reactive structures and NOx emissions of methane/hydrogen mixtures in flameless combustión. M. Ferrarotti, W. De Paepe, A. Parente. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319921028597

Ammonia/Methane combustion: Stability and NO<sub>x</sub> emissions. Giovanni Battista Ariemma, Giancarlo Sorrentino, Raffaele Ragucci, Mara de Joannon, Pino Sabia.<u>https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0010218022000906</u>

# 9. Presupuesto

El presupuesto elaborado en esta sección corresponde al proyecto al que se refiere la memoria, desarrollado en las instalaciones del CMT (Clean Mobility & Thermofluids) de la Universidad Politécnica de Valencia. Incluye tanto los gastos relacionados con la mano de obra como los gastos por los materiales y equipos utilizados durante el proyecto.

**Mano de obra**: se refiere a todo el personal necesario para llevar a cabo las actividades realizadas durante el proyecto. Esto a su vez se puede desglosar en función de su cargo de responsabilidad y/o funciones en:

- Ingeniero junior
- Ingeniero senior
- Técnico de sala

**Materiales y equipos**: abarca todas las instalaciones de las que su uso se ha requerido durante el desarrollo de este trabajo, incluyendo el quemador, el combustible, la cámara, los termopares, los equipos detectores de emisiones contaminantes, etc.

El cálculo de los costes acarreados por la realización de este proyecto servirá para analizar su viabilidad económica.

### 9.1. Costes por mano de obra

Para calcular el coste por mano de obra se tendrá en cuenta el número de horas trabajadas por los distintos componentes del personal, así como su salario y otros gastos asociados al personal que trabaja directamente en el proyecto:

	Coste (€/h)	Cantidad (h)	Precio (€)
Ingeniero junior (autor)	25	180	4500
Ingeniero senior	45	240	10800
Técnico de sala	20	120	2400
Costes po	17700		

Tabla 8: Coste por mano de obra

## 9.2. Costes por materiales y equipo

Para la estimación de los costes de los materiales y el equipo utilizado durante este trabajo se tendrán en cuenta las horas de uso, así como un estimador de su costo por hora:

	Coste (€/h)	Cantidad (h)	Precio (€)
Quemador de gas	195.83	90	17624.7
Metano	63.19	90	5687.1
Cámara	12.5	90	1125
Testo	8.34	90	750.6
Horiba OBS-ONE	19.71	90	1773.9
Otros equipos	20	90	1800
Costes por m	28761.3		

Tabla 9: Coste por materiales y equipo

## 9.3. Presupuesto total

En esta sección se calculará en primer lugar el presupuesto total del proyecto, que es resultado de sumar los costes de mano de obra y de los materiales y equipo. Seguidamente, también se calculará el coste que supondría contratar a una empresa que se ocupe de este proyecto, teniendo en cuenta un estimado del beneficio industrial y el IVA.

	Precio (€)
Costes por mano de obra	17700
Costes por materiales y equipo	28761.3
Presupuesto del proyecto	46461.3

Tabla 10: Presupuesto del proyecto

	Precio (€)
Presupuesto del proyecto	46461.3
Beneficio industrial (~10%)	4646.13
Coste de contratación	51107.43
IVA(21%)	10732.5603
Coste total	61839.9903

Tabla 11:Coste total

# Pliego de condiciones

En esta sección recoge las normas, condición de los equipos e instrucciones esenciales para poder replicar el trabajo anteriormente expuesto.

## Condiciones de los materiales

Pues cada uno de los equipos utilizados durante el desarrollo experimental del presente proyecto deben de estar en condiciones de buen funcionamiento.

Para ello, antes de comenzar con los ensayos siempre se realizará una revisión general donde se comprobará que el quemador está en buenas condiciones, que queda combustible en los cilindros, que hay corriente eléctrica en el laboratorio, se abrirán las válvulas de aire, se comprobará que funcionan los ordenadores y los aparatos de medida y se revisará el PLC.

## Condiciones de la ejecución

Durante la ejecución de los ensayos nadie debe de estar dentro del laboratorio puesto que se trabaja con temperaturas altas y con combustible altamente inflamable.

En caso de que la llama se apague o de que el tubo piloto se caliente excesivamente se debe cortar el flujo de combustible.

Tras un ensayo, no se procederá con el siguiente hasta que bajen las temperaturas de la cámara de combustión del quemador.

## Normativa de seguridad

Tras los ensayos es obligatorio el uso de guantes de protección si se va a manipular cualquier parte del quemador puesto que habrá sido expuesto a altas temperaturas.

Como se expuso anteriormente, nadie debe de estar en la sala de ensayos durante la realización de estos.

En caso de que no se estén realizando pruebas, el flujo de combustible debe de estar cerrado.

## Marco legal

#### Real Decreto 488/1997, de 14 de abril

En cuanto al marco legal, el Real Decreto 486/1997 del 14 de Abril establece las establece los reglamentos y normas para establecer un adecuado nivel de protección de la salud de los trabajadores frente a los riesgos derivados de las condiciones de trabajo, en el marco de una política coherente, coordinada y eficaz:

#### 1. Equipo

#### a) Observación general.

La utilización en sí misma del equipo no debe ser una fuente de riesgo para los trabajadores.

#### b) Pantalla.

Los caracteres de la pantalla deberán estar bien definidos y configurados de forma clara, y tener una dimensión suficiente, disponiendo de un espacio adecuado entre los caracteres y los renglones.

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 deberá ser orientable e inclinable a voluntad, con facilidad para adaptarse a las necesidades del usuario.

Podrá utilizarse un pedestal independiente o una mesa regulable para la pantalla.

La pantalla no deberá tener reflejos ni reverberaciones que puedan molestar al usuario.

#### c) Teclado.

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 disposición del teclado y las características de las teclas deberán tender a facilitar su utilización.

Los símbolos de las teclas deberán resaltar suficientemente y ser legibles desde la posición normal de trabajo.

d) Mesa o superficie de trabajo.
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 espacio deberá ser suficiente para permitir a los trabajadores una posición cómoda.

### e) Asiento de trabajo.

El asiento de trabajo deberá ser estable, proporcionando al usuario libertad de movimiento y procurándole una postura confortable.

La altura del mismo deberá ser regulable.

El respaldo deberá ser reclinable y su altura ajustable.

Se pondrá un reposapiés a disposición de quienes lo deseen.

#### 2. Entorno

#### a) Espacio.

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.

#### b) Iluminación.

La iluminación general y la iluminación especial (lámparas de trabajo), cuando sea necesaria, deberán garantizar unos niveles adecuados de iluminación y unas relaciones adecuadas de luminancias entre la pantalla y su entorno, habida cuenta del carácter del trabajo, de las necesidades visuales del usuario y del tipo de pantalla utilizado.

El acondicionamiento del lugar de trabajo y del puesto de trabajo, así como la situación y las características técnicas de las fuentes de luz artificial, deberán coordinarse de tal manera que se eviten los deslumbramientos y los reflejos molestos en la pantalla u otras partes del equipo.

### c) Reflejos y deslumbramientos.

Los puestos de trabajo deberán instalarse de tal forma que las fuentes de luz, tales como ventanas y otras aberturas, los tabiques transparentes o translúcidos y los equipos o tabiques de color claro no provoquen deslumbramiento directo ni produzcan reflejos molestos en la pantalla. 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.

# d) Ruido.

El ruido producido por los equipos instalados en el puesto de trabajo deberá tenerse en cuenta al diseñar el mismo, en especial para que no se perturbe la atención ni la palabra.

## e) Calor.

Los equipos instalados en el puesto de trabajo no deberán producir un calor adicional que pueda ocasionar molestias a los trabajadores.

# f) Emisiones.

Toda radiación, excepción hecha de la parte visible del espectro electromagnético, deberá reducirse a niveles insignificantes desde el punto de vista de la protección de la seguridad y de la salud de los trabajadores.

# g) Humedad.

Deberá crearse y mantenerse una humedad aceptable.