



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA


ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial
y Diseño Industrial

SIMULACIÓN DE LA INYECCIÓN DE HIDRÓGENO
PREMEZCLADO EN TURBINAS DE GAS DE FLUJO
CONTINUO

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

AUTOR/A: Ferriz Navarro, Álvaro

Tutor/a: Martí Gómez-Aldaraví, Pedro

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial y Diseño Industrial

Universitat Politècnica de Valencia

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AEROSPAZIAL Y DISEÑO INDUSTRIAL

SIMULACIÓN DE LA INYECCIÓN DE HIDRÓGENO PREMEZCLADO EN TURBINAS DE GAS DE FLUJO CONTINUO

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería Aeroespacial

Autor: Ferriz Navarro, Álvaro

Tutor: Martí Gómez-Aldaraví, Pedro

Curso Académico: 2023/2024

AGRADECIMIENTOS

Todo esfuerzo tiene su recompensa y, en primer lugar, me gustaría agradecer a Pedro por ser mi tutor y por haberme ayudado en todos los problemas que han surgido durante la realización de este proyecto. También quiero agradecer al Instituto Universitario CMT por ofrecer los recursos necesarios para llevar a cabo el trabajo.

Tengo mucho que agradecer, especialmente a mis padres, José Vicente y Ángeles, quienes han sido el apoyo fundamental en esta etapa llena de buenos y malos momentos. Ante todo, ellos han creído en mí, incluso en algunas ocasiones más que yo mismo. También quiero agradecer a mis abuelos, en especial a mi abuela Avelina, la persona que ha sido una segunda madre en mi vida y con la que me crié en gran parte de mi infancia.

Podría seguir enumerando a muchas personas que me han acompañado en el camino, pero en especial quiero recordar a gran parte de mi familia: Cristian, Lorena, Dori, Alonso, Triana, Joaquín, Ana Belén, Luisa, Beatriz, y muchas más personas, así como a mis amigos de mi ciudad natal: Juan Miguel, José, Daniel, Recaredo, Filiberto, Samuel, y Alejandro.

En fin, sólo me queda agradecer a toda la gente que siempre estuvo en el camino.

RESUMEN

El aumento del nivel de vida de la humanidad ha producido un incremento en la emisión de gases de efecto invernadero como el CO_2 , provocando un aumento de la preocupación de los países acerca de las consecuencias sobre el cambio climático y como consecuencia en la humedad. Ante esta problemática las principales potencias del mundo están aplicando nuevas normativas a distintos sectores de la economía con el fin de descarbonizar la industria. Entre ellos el sector del transporte, en el cual se encuentra la aviación, donde cada vez se imponen nuevas restricciones a los fabricantes. Entre distintas estrategias con el fin de conseguir este objetivo, el empleo de hidrógeno como combustible que sustituya los actuales combustibles fósiles se posiciona como una interesante solución que todavía se encuentra en vías de desarrollo, con lo cual es necesario evaluar el impacto de usar hidrógeno como combustible, siendo necesario el análisis de los efectos que producen en las aeronaves y que efectos se producen en términos de prestaciones de las plantas propulsivas. En el presente documento se realizará un estudio CFD (*Computational Fluid Dynamics*) con el fin de analizar el proceso de inyección de hidrógeno en un quemador KIAI (*Knowledge for Ignition, Acoustics and Instabilities*) de flujo continuo con el fin de comprender el proceso de mezcla aire-combustible. A través de ello, se podrá tener una mayor comprensión del proceso, con la finalidad de mejorar las prestaciones de las actuales plantas propulsivas.

Palabras Clave: CFD, LES, hidrógeno, inyección, combustión continua

RESUM

L'increment del nivell de vida de la humanitat ha produït un augment en l'emissió de gasos d'efecte hivernacle com el CO_2 , provocant un augment de la preocupació dels països sobre les conseqüències del canvi climàtic i com a conseqüència en la humanitat. Davant aquesta problemàtica, les principals potències del món estan aplicant noves normatives a diferents sectors de l'economia amb la finalitat de descarbonitzar la indústria. Entre ells el sector del transport, en el qual es troba l'aviació, on cada vegada s'imposen noves restriccions als fabricants. Entre diferents estratègies amb la finalitat d'assolir aquest objectiu, l'ús d'hidrogen com a combustible que substituïska els actuals combustibles fòssils es posiciona com una interessant solució que encara es troba en vies de desenvolupament, pel que és necessari avaluar l'impacte de l'ús d'hidrogen com a combustible, sent necessari l'anàlisi dels efectes que produeixen en les aeronaus i quins efectes es produeixen en termes de prestacions de les plantes propulsives. En el present document es realitzarà un estudi CFD (*Computational Fluid Dynamics*) amb la finalitat d'analitzar el procés d'injecció d'hidrogen en un cremador KIAI (*Knowledge for Ignition, Acoustics and Instabilities*) de flux continu amb la finalitat de comprendre el procés de barreja aire-combustible. A través d'això, es podrà tenir una major comprensió del procés, amb la finalitat de millorar les prestacions de les actuals plantes propulsives.

Palabras Clave: CFD, LES, hidrogen, injecció, cremada contínua

ABSTRACT

The increase in the standard of living of humanity has led to an increase in the emission of greenhouse gases such as CO_2 , causing a heightened concern among countries regarding the consequences of climate change and consequently on humanity. Faced with this issue, the world's leading powers are implementing new regulations across various sectors of the economy to decarbonize industry. Among them is the transportation sector, within which aviation is situated, where manufacturers are increasingly facing new restrictions. Among various strategies aimed at achieving this goal, the use of hydrogen as a fuel to replace current fossil fuels emerges as an intriguing solution that is still under development. Thus, it is necessary to assess the impact of using hydrogen as fuel, requiring an analysis of its effects on aircraft and its effects in terms of propulsion system performance. This document will conduct a Computational Fluid Dynamics (CFD) study to analyze the hydrogen injection process in a continuous flow KIAI burner (Knowledge for Ignition, Acoustics and Instabilities) in order to understand the air-fuel mixing process. Through this, a better understanding of the process can be attained, aiming to enhance the performance of current propulsion systems.

Palabras Clave: CFD, LES, hydrogen, injection, continuous combustion

Índice

1. Introducción	6
1.1. Relación del trabajo con los ODS	6
1.2. Emisiones de gases contaminantes	6
1.3. Empleo de hidrógeno como combustible de aviación	7
1.4. Motivación	9
1.5. Objetivos del proyecto	10
1.6. Antecedentes del caso de estudio	10
2. Principios del proceso de inyección en turborreactores	12
2.1. Conceptos básicos	12
2.2. Cámara de combustión	13
2.2.1. Geometría de las cámaras de combustión	13
2.2.2. Subsistemas de la cámara de combustión	13
2.2.3. Flujo de aire en la cámara de combustión	14
2.3. Acondicionamiento del combustible	15
2.4. Descripción del caso de estudio	16
3. Metodología CFD	20
3.1. Fundamentos CFD	20
3.1.1. Ecuaciones de Navier-Stokes	20
3.1.2. Conceptos de discretización del dominio	22
3.1.3. Modelado de la turbulencia	22
3.2. Preproceso del caso	26
3.2.1. Malla computacional	26
3.2.2. Condiciones de contorno	27
3.2.3. Condiciones iniciales	28
3.3. Postproceso del caso	28
3.3.1. Análisis transitorio	29
3.3.2. Análisis en frecuencia	34
3.3.3. Índices de calidad en LES	36
4. Síntesis de resultados	43
4.1. Estudio del caso 1	43
4.1.1. Estudio de los campos de velocidades	43
4.1.2. Estudio del proceso de mezcla	45
4.2. Estudio del caso 2	46
4.2.1. Estudio de los campos de velocidades	46
4.2.2. Estudio del proceso de mezcla	49
4.2.3. Estudio de las estructuras del flujo	51

5. Conclusiones y vías futuras	54
5.1. Conclusiones	54
5.2. Vías de desarrollo futuras	55
6. Pliego de condiciones	56
6.1. Condiciones y normativa general	56
6.1.1. Derechos y deberes de los trabajadores	56
6.1.2. Condiciones del puesto de trabajo	57
6.2. Condiciones específicas	59
7. Presupuestos	60
7.1. Enfoque del presupuesto	60
7.1.1. Procedimiento presupuestario	60
7.1.2. Desglose de costes	60
7.1.3. Costes unitarios	61
7.1.4. Cálculo del presupuesto total	62

Índice de figuras

1.	ODS relacionados con el desarrollo del trabajo.	6
2.	Consumo de las principales fuentes de energía a lo largo de las décadas.	7
3.	Aportación de gases de efecto invernadero por sector.	8
4.	Previsión de emisiones anuales de gases de efecto invernadero asociadas a distintos escenarios.	9
5.	Esquema del motor de un turborreactor.	12
6.	Geometría de las cámaras de combustión actuales.	13
7.	Esquema general de una cámara de combustión.	14
8.	Esquema del flujo de aire a través de la cámara de combustión.	14
9.	Geometría del quemador KIAI.	16
10.	Geometría de la corona del inyector tipo <i>swirler</i>	17
11.	Estructura del flujo en inyectores tipo <i>swirler</i>	18
12.	Tipos de celdas según su forma.	22
13.	Esquemas de flujo laminar y flujo turbulento.	23
14.	Diagrama de la Cascada de Energía Cinética Turbulenta	24
15.	Comparación de resultados mediante modelos DNS, LES y RANS.	26
16.	Malla computacional del caso de estudio.	27
17.	Puntos de control para analizar el transitorio.	29
18.	Análisis del estacionario de la señal mediante el ANOVA.	30
19.	Evolución de la concentración de hidrógeno en los puntos de control (Caso 1).	31
20.	Evolución de la concentración de hidrógeno en los puntos de control (Caso 2).	32
21.	Evolución de la presión relativa en los puntos de control (Caso 1).	33
22.	Evolución de la presión relativa en los puntos de control (Caso 2).	34
23.	Espectro de frecuencia del caso 1 (a) y caso 2 (b).	36
24.	Espectros de frecuencia de casos similares encontrados en la bibliografía.	36
25.	Media temporal del índice $LES-IQ_v$ en el plano $[x=0]$ (caso 1).	37
26.	Media temporal del índice $LES-IQ_v$ en el plano $[x=0]$ (caso 2).	38
27.	Media temporal del índice $LES-IQ_\eta$ en el plano $[x=0]$ (caso 1).	39
28.	Media temporal del índice $LES-IQ_\eta$ en el plano $[x=0]$ (caso 2).	39
29.	Media temporal del índice $LES-IQ_k$ en el plano $[x=0]$ (caso 1).	40
30.	Media temporal del índice $LES-IQ_k$ en el plano $[x=0]$ (caso 2).	40
31.	Promediado de velocidad axial U_z (a) y fluctuaciones de la velocidad axial u_z (b) del caso 1.	43
32.	Promediado de velocidad tangencial U_θ (a) y fluctuaciones de la velocidad tangencial u_θ (b) del caso 1.	44
33.	Promediado de velocidad radial U_r (a) y fluctuaciones de la velocidad radial u_r (b) del caso 1.	44
34.	Evolución del proceso de mezcla (caso 1).	45
35.	Promediado de velocidad axial U_z (a) y fluctuaciones de la velocidad axial u_z (b) del caso 2.	46

36.	Promediado de velocidad tangencial U_θ (a) y fluctuaciones de la velocidad tangencial u_θ (b) del caso 2.	47
37.	Promediado de velocidad radial U_r (a) y fluctuaciones de la velocidad radial u_r (b) del caso 2.	47
38.	Promediado de la velocidad axial U_z (a) y promediado del RMS de la velocidad axial u_z (b) en el plano $[x=0]$	48
39.	Promediado de la velocidad tangencial U_θ (a) y promediado del RMS de la velocidad tangencial u_θ (b) en el plano $[x=0]$	48
40.	Promediado de la velocidad radial U_r (a) y promediado del RMS de la velocidad radial u_r (b) en el plano $[x=0]$	49
41.	Evolución del proceso de mezcla (caso 2).	50
42.	Contorno de velocidad de las iso-superficies de los límites de inflamabilidad de la mezcla.	51
43.	Visualización de la CRZ (<i>Corner Recirculation Zone</i>) del caso 2 a través de líneas de corriente sobre la concentración de H_2	52
44.	Visualización del PVC (<i>Precessing Vortex Core</i>) a través de iso-superficies de criterio-Q e iso-superficies de criterio- λ_2	53

Índice de cuadros

1.	Datos específicos del caso de estudio.	17
2.	Características de la malla computacional y sub-regiones de la malla.	27
3.	Detalles de la condición de contorno de las paredes.	28
4.	Detalles de las condiciones de contorno de "plenum inlet" y "central inlet" para los casos 1 y 2.	28
5.	Detalles de las condiciones iniciales.	28
6.	Detalles de los puntos de control para analizar el transitorio.	29
7.	Valores de número de Swirl para los casos de estudio en $z=0,25D$ sobre el eje de inyección	35

1. Introducción

1.1. Relación del trabajo con los ODS

La motivación del trabajo presente responde a las nuevas necesidades del sector aeronáutico de adaptarse a los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible), presentados por los Estados Miembros de las Naciones Unidas y recogido en la Agenda 2030. Todo ello con el objetivo de hacer frente a distintos problemas globales y en particular al problema del cambio climático que concierne al sector del transporte. En particular, el desarrollo de este proyecto está relacionado con el ODS 7 (Energía Asequible y No Contaminante), el ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura) y el ODS 13 (Acción por el Clima).



Figura 1: ODS relacionados con el desarrollo del trabajo.

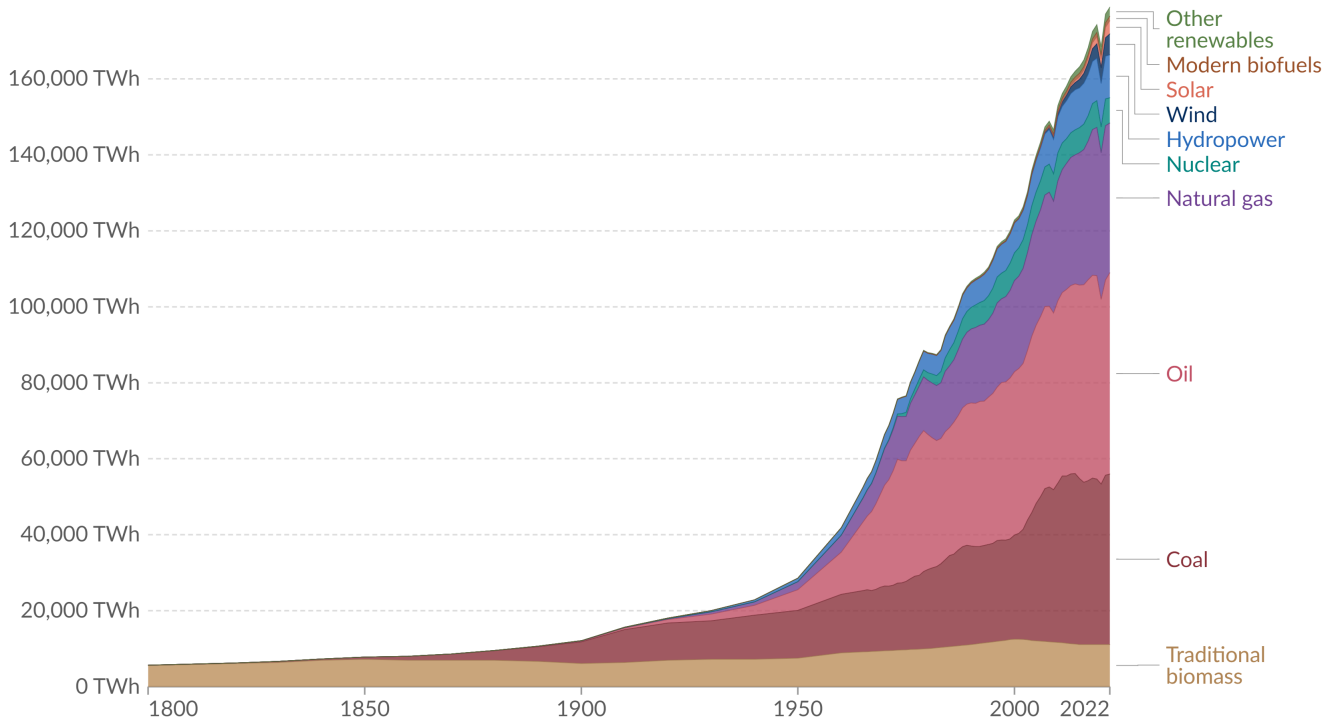
1.2. Emisiones de gases contaminantes

El aumento de la cantidad de energía a la cual nos está llevando el modelo de vida actual, está relacionado directamente con la emisión de gases contaminantes, como por ejemplo los gases de efecto invernadero, como muestran las estadísticas el aumento es notorio durante las últimas décadas y no parece que tenga previsto disminuir a no ser que se tomen medidas ante esta subida [14]. El sector del transporte y en particular el sector de la aviación representan un importante porcentaje de las emisiones de gases contaminantes y más concretamente en la emisión de gases de efecto invernadero, contribuyendo a aumentar los efectos del cambio climático. Según las estadísticas más recientes [14], el sector transporte genera aproximadamente el 16,2% del CO_2 mundial y dentro de este sector, el sector de la aviación genera el 1,9% del CO_2 mundial.

Debido a la necesidad de disminuir los efectos del cambio climático, el sector del transporte se encuentra en una continua evolución con el fin de reducir en la medida de lo posible su huella de carbono. La aviación como parte de este sector también busca estrategias para lograr este propósito, aunque debido a las necesidades propulsivas de estos medios de transporte los cambios son costosos desde el punto de vista económico y estructural, debido a la gran inversión que se necesita para conseguir prestaciones similares a las actuales que son proporcionadas por los actuales combustibles como puede ser el queroseno, aunque se están realizando grandes esfuerzos para conseguirlo. Ante esta problemática otros combustibles como el H_2 y los SAFs (*Sustainable Aviation Fuels*) se posicionan como posibles soluciones.

Global primary energy consumption by source

Primary energy¹ is based on the substitution method² and measured in terawatt-hours³.



Data source: Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2023); Smil (2017)

OurWorldInData.org/energy | CC BY

Note: In the absence of more recent data, traditional biomass is assumed constant since 2015.

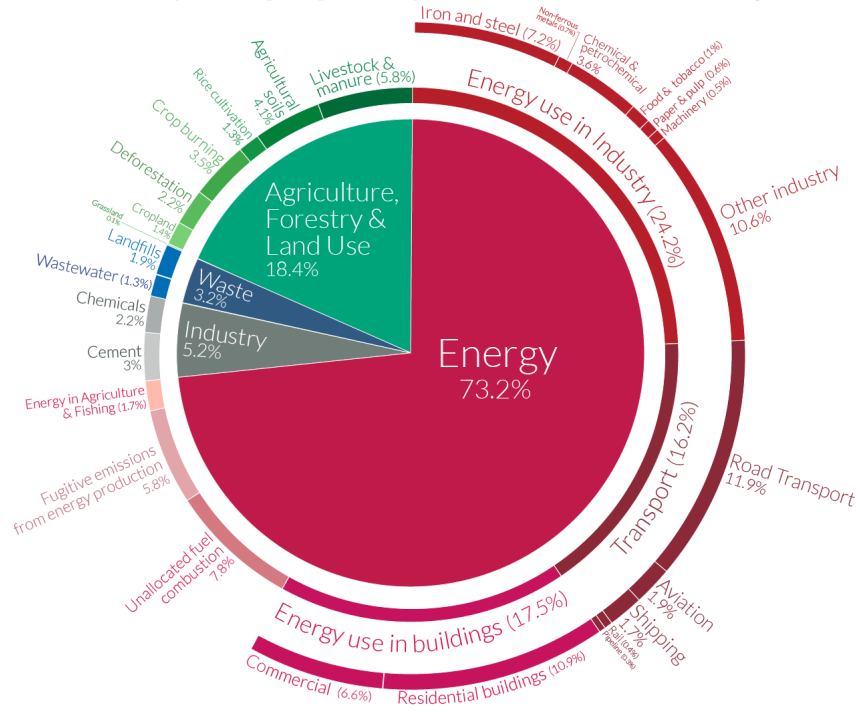
Figura 2: Consumo de las principales fuentes de energía a lo largo de las décadas.

1.3. Empleo de hidrógeno como combustible de aviación

La idea de emplear H_2 como combustible en el sector de la aviación surge como posible solución para cumplir la normativa de emisiones, promovida por los países miembros de la Unión Europea y recogida en el tratado internacional del Acuerdo de París, donde se refleja la necesidad de alcanzar un nivel de emisiones de CO_2 neutro. Esto quiere decir que la industria debe generar una cantidad de CO_2 lo suficientemente baja para que el planeta de forma natural pueda absorber esa cantidad. A nivel global esto implica que las emisiones de gases de efecto invernadero no deben superar una cantidad que produzca un aumento de la temperatura del planeta en más de $2^\circ C$, con el fin de evitar ciertos efectos negativos sobre la vegetación del planeta y la fauna del planeta, afectando de forma catastrófica a los actuales ecosistemas del planeta. De nuevo las estadísticas [14] ofrecen una visión objetiva de las medidas que son necesarias adoptar para evitar dichas consecuencias, siendo la solución reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a 0 a lo largo del actual siglo, lo cual justifica estas normativas, las cuales se endurecerán más a lo largo de los

Global greenhouse gas emissions by sector

This is shown for the year 2016 – global greenhouse gas emissions were 49.4 billion tonnes CO₂eq.



OurWorldinData.org – Research and data to make progress against the world's largest problems. Source: Climate Watch, the World Resources Institute (2020). Licensed under CC-BY by the author Hannah Ritchie (2020).

Figura 3: Aportación de gases de efecto invernadero por sector.

años [14].

Desde el punto de vista de la reducción de gases de efecto invernadero el H_2 se posiciona por delante de los SAFs, ya que si se buscan lograr esos objetivos de emisiones 0, es necesario recurrir a combustibles libres de carbono, como por ejemplo el H_2 , a pesar de ello, las emisiones de NO_x también están presentes pero en un menor porcentaje. Con el fin de proponer soluciones ante el problema de la descarbonización, las compañías más importantes del sector de la aviación, están trabajando para lograr este propósito, un ejemplo de ello es el proyecto ZEROe de la compañía Airbus, a través del cual la compañía busca desarrollar aviones comerciales cuyas plantas propulsivas no emitan gases contaminantes para el año 2035, mediante el empleo de hidrógeno líquido en sustitución de los combustibles en base carbono y el uso de la energía eléctrica como fuente principal de potencia [11]. Pese a lo expuesto, cabe destacar que las actuales vías de generación de H_2 totalmente libre de carbono desde un análisis LCA todavía se encuentran lejos de ser una realidad.

Desde el punto de vista puramente enfocado en la combustión, el H_2 presenta muchas ventajas. Su poder calorífico es aproximadamente tres veces mayor que los actuales querosenos, lo que tiene implicaciones positivas en cuanto al consumo de combustible y el peso necesario para dar una potencia determinada para la misma misión. El problema de emplear este combustible se encuentra en la integración

de los depósitos en las aeronaves, debido a su baja densidad energética, para generar la misma energía son necesarios unos tanques muy voluminosos, lo cual conlleva a rediseñar la geometría de las actuales aeronaves ya que no es posible integrar el combustible en el ala. Debido a la necesidad de presurizar a altos niveles el H_2 , el diseño de los tanques se complican. Por otro lado, debido a sus características con el fin de evitar el efecto de retorno de llama ("flashback") y evitar una catástrofe se vuelve necesario diseñar los quemadores con un diámetro lo suficientemente pequeño, lo cual es complicado y costoso desde el punto de vista de fabricación.

Global greenhouse gas emissions and warming scenarios Our World in Data

- Each pathway comes with uncertainty, marked by the shading from low to high emissions under each scenario.
- Warming refers to the expected global temperature rise by 2100, relative to pre-industrial temperatures.

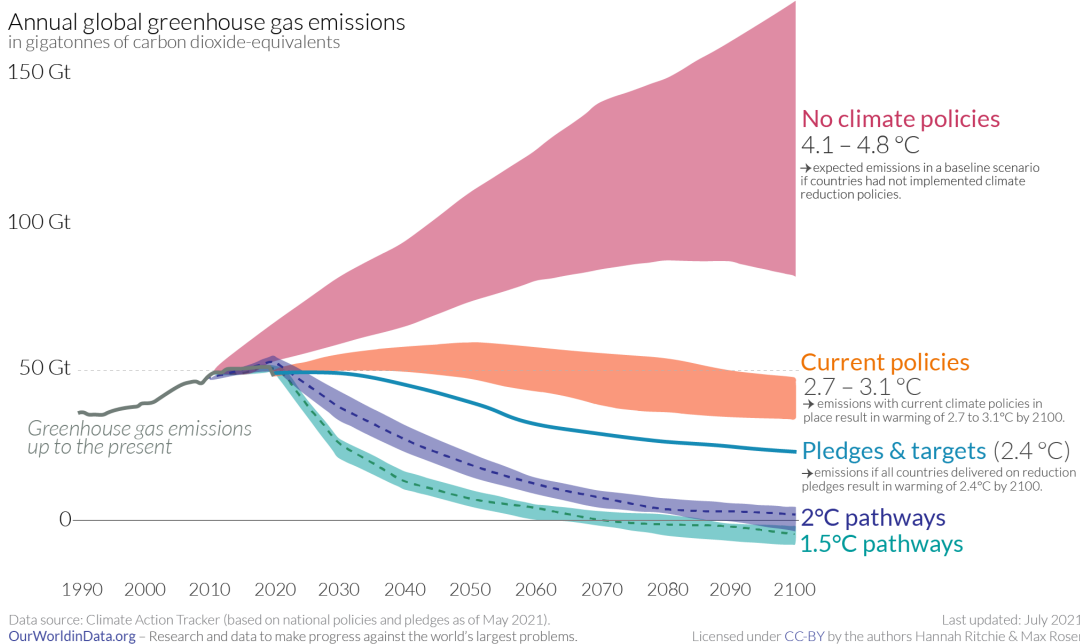


Figura 4: Previsión de emisiones anuales de gases de efecto invernadero asociadas a distintos escenarios.

1.4. Motivación

Como se ha expuesto, existe un gran interés en el desarrollo de plantas propulsivas que empleen hidrógeno como combustible en la aviación, lo cual justifica el empleo de recursos en mejorar dicha tecnología. El presente documento tiene como interés apoyar el desarrollo de esta nueva tecnología, donde se abordará la interacción aire-hidrógeno mediante el análisis de un inyector tipo *swirler* en un quemador de flujo continuo mediante un software *CFD*, concretamente *StarCCM+*, con el fin de mejorar el proceso de combustión (no es la motivación del presente documento abordar la combustión) permitiendo un mejor aprovechamiento de este combustible. En el presente trabajo se ha decidido reproducir un caso de geometría simplificada, debido a que esto permitirá correlacionar los resultados de las simulaciones *CFD*

del caso con un caso real, debido a que favorece la repetitividad del experimento, permitiendo validar los datos y abriendo nuevas rutas de desarrollo en un futuro.

En el documento también se realizará un análisis teórico del problema, lo cual facilitará el acercamiento al problema en cuestión y los detalles empleados en la reproducción del caso real en la herramienta de cálculo empleada. Para finalizar se presentarán los resultados obtenidos acompañados de una serie de conclusiones en relación a estos.

1.5. Objetivos del proyecto

Los objetivos van en la dirección de lo expuesto anteriormente, analizar y caracterizar el proceso de mezcla aire-hidrógeno de un quemador de flujo continuo empleado en el sector de la aviación mediante una herramienta de cálculo de mecánica de fluidos computacional *CFD*, con el fin de correlacionarlo con un caso real. Para alcanzar satisfactoriamente un buen resultado, se han de satisfacer los siguientes objetivos.

1. Entender los principios físicos que gobiernan el proceso de inyección en un quemador de flujo continuo.
2. Aplicar de forma correcta el software de cálculo *CFD* para distintas configuraciones de inyección.
3. Análisis del caso de estudio mediante programas de post-procesado que permitan entender que configuración tendría más potencial de desarrollo.
4. Distinguir el transitorio y estacionario del proceso de inyección de H_2 , para conocer el instante donde se pasa de uno a otro.
5. Validar los resultados del cálculo con los obtenidos en otras publicaciones.
6. Compresión de los resultados obtenidos y determinación de la mejor configuración para futuras etapas en el desarrollo del quemador.

1.6. Antecedentes del caso de estudio

El caso a estudiar en el presente trabajo es una extensión del trabajo expuesto por A.J. Serrano García [15] (donde también se expuso el trabajo de M. David Barre [1]) el proceso de inyección de hidrógeno en la misma geometría con una configuración. En las conclusiones de ese documento se comenta que es interesante probar distintas configuraciones variando las condiciones de contorno para bajar la velocidad en la zona central de la inyección, con el fin de buscar una mejor estructura del flujo y mejorar la combustión. Atendiendo a sus conclusiones, en el presente documento se probarán nuevas configuraciones para mejorar la formación de las estructuras del flujo en estos quemadores.

2. Principios del proceso de inyección en turborreactores

2.1. Conceptos básicos

Con el fin de aclarar conceptos y facilitar la comprensión del caso, a lo largo de este apartado se detallarán los principios físicos y tecnológicos que gobiernan el proceso de inyección en quemadores de combustión continua.

Con el fin de situar el caso a estudiar desde una visión más global, se va a detallar de una forma básica el funcionamiento general de un turborreactor [1] y [7]. Como se puede ver en la figura 5, el aire libre de la atmósfera atraviesa el núcleo del motor encontrándose al difusor el cual permite adecuar la velocidad y presión del flujo para las siguientes etapas. Cuando el flujo pasa por el difusor, se encuentra con un compresor el cual permite aumentar la presión de parada del flujo, aumentando consecuentemente la temperatura. El flujo llega a la cámara de combustión, donde en un proceso a presión constante (ciclo ideal), el combustible es inyectado y mezclado, donde mediante un proceso de combustión se consigue aumentar la temperatura del flujo. Ese flujo caliente es dirigido hacia la turbina donde la energía es transformada en potencia mecánica, la cual se emplea en arrastrar el compresor a través de un eje que une ambos componentes. Por último, esos gases todavía a una presión alta se expanden en la tobera, donde se consigue el empuje acelerando los gases, que se encuentran con la atmósfera. Existen distintas arquitecturas de motores de aviación (posibilidad de post-combustor) aunque de forma general todos tienen un funcionamiento similar.

El caso de estudio en el cual se centra este trabajo se encuentra en la cámara de combustión, ya mencionada anteriormente, en la cual se sitúa el inyector de combustible. La teoría acerca de todo el desarrollo detrás del diseño de una cámara de combustión es extremadamente compleja, dicho esto, en el presente documento se tratarán las partes que atañen al caso de estudio [10] y [12].

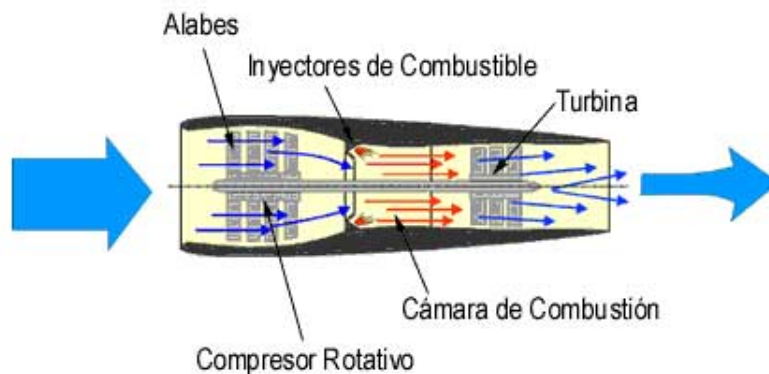


Figura 5: Esquema del motor de un turborreactor.

2.2. Cámara de combustión

2.2.1. Geometría de las cámaras de combustión

La cámara de combustión es un componente fundamental de los aerorreactores, con lo cual el diseño y el análisis de estas es fundamental para la optimización de las plantas propulsivas, ya que es aquí donde se consiguen las mayores temperaturas del ciclo de trabajo, permitiendo sacar el máximo beneficio posible a este, con lo cual es esencial conocer la mejor geometría posible.

Las cámaras de combustión se clasifican en función de la posición de los quemadores. Las distintas configuraciones son tubular, anular o una fusión de estas dos llamadas tubo-anular como se puede ver en la figura 6. En la actualidad la mayoría de cámaras de combustión presentan una geometría anular por dos ventajas fundamentales, una alta eficiencia y un bajo peso (dos ventajas claves en el sector de la aviación y aeroespacial en general), pese a ello los tres tipos de geometría se siguen utilizando.

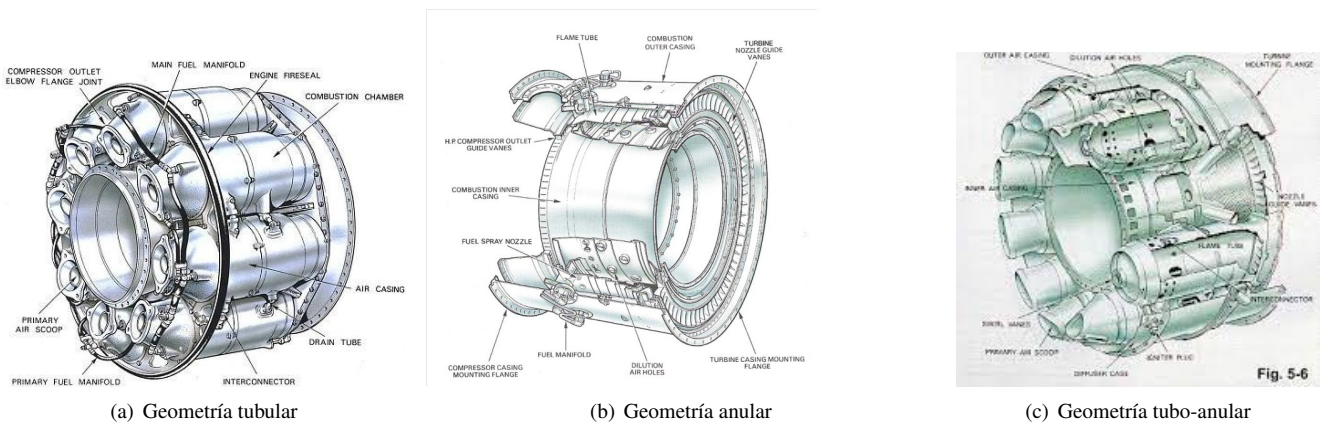


Figura 6: Geometría de las cámaras de combustión actuales.

Por otro lado, no sólo la geometría es importante a la hora de tener en cuenta el diseño de la cámara de combustión. Como se ha comentado, durante el ciclo los gases van cambiando tanto presión como temperatura, con lo cual los materiales deben soportar esas altas temperaturas, que suelen oscilar entre 700°C y 1700°C. Aguas abajo de la cámara de combustión, se encuentran las primeras etapas de turbina, que deben soportar una temperatura altísima, no solo eso sino que como producto de la combustión, esas etapas de turbina se encuentran en contacto con especies químicas corrosivas que suelen generar depósitos, dañando la geometría de los álabes y afectando al rendimiento de estos y por otro lado deben soportar importantes cargas aerodinámicas, con lo cual es crítico el diseño para un funcionamiento correcto del conjunto.

2.2.2. Subsistemas de la cámara de combustión

Dentro del concepto de la cámara de combustión, se pueden visualizar distintas partes que forman el sistema, como se puede ver en la figura 7.

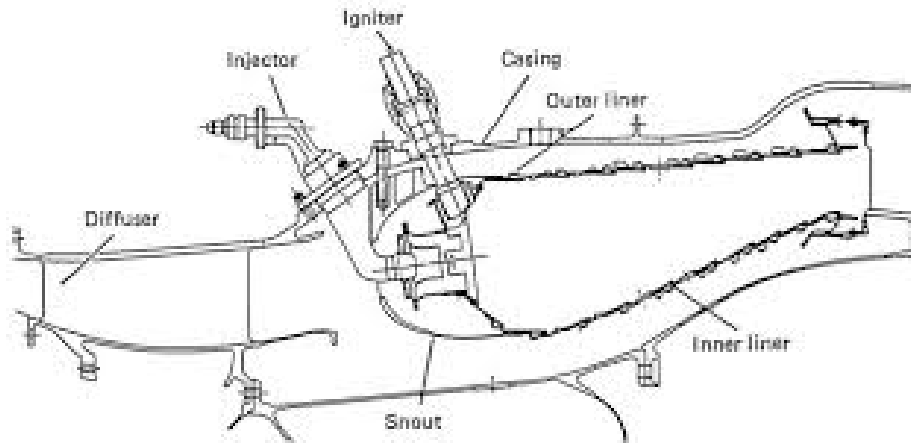


Figura 7: Esquema general de una cámara de combustión.

A modo de resumen, una breve descripción de las principales componentes y su función:

- Carcasa: es la envoltura que encierra el tubo de llama. Resiste las altas presiones que ejercen los gases productos de la combustión.
- Tubo de llama: es la zona donde se produce la combustión.
- Inyector: es el subsistema que aporta el combustible en la cámara de combustión, donde previamente se han producido una serie de procesos preparatorios para favorecer la mezcla aire-combustible.
- "Swirler": es un estator que permite adecuar la velocidad del fluido, haciendo que este entre girando favoreciendo la mezcla aire-combustible.
- Bujías: son los subsistemas encargados del proceso de encendido de la mezcla.

2.2.3. Flujo de aire en la cámara de combustión

Entender los procesos que ocurren dentro de la cámara de combustión es también comprender como se comporta el flujo de aire dentro de la misma, a través de la figura 8 se puede ver un esquema del flujo en estas geometrías.

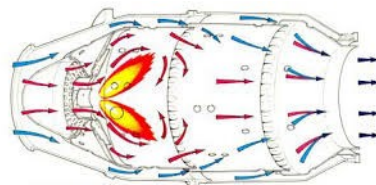


Figura 8: Esquema del flujo de aire a través de la cámara de combustión.

Dentro de la cámara de combustión se pueden distinguir tres zonas claramente diferenciadas. De forma breve una explicación teórica de las tres:

- **Zona primaria.** El aire que entra a la cámara de combustión se separa en dos, una corriente que se dirige al tubo de llama (aire primario) y otra donde el aire pasa por una zona externa al tubo de llama para luego introducirse de nuevo en esta zona con el fin de diluir la mezcla (aire intermedio y de dilución), proceso conocido como aireación con el fin de mejorar las propiedades de la combustión. El aire primario constituye entre el 15 % y 20 % del aire total y es redirigido por el *swirler* hacia una región cercana a donde se produce la inyección del combustible. Cerca de los inyectores, la mezcla es ligeramente rica, elevando la temperatura y aumentando la velocidad de combustión. Debido al efecto rotatorio introducido por el *swirler* se forman unos torbellinos que arrastran los gases calientes producidos por la combustión, estabilizando el frente de llama, evitando el soplado de llama y favoreciendo la mezcla aire-combustible.
- **Zona secundaria o intermedia.** Alrededor de un 40 % de aire que entra en la cámara de combustión es inyectado en una zona posterior a la zona primaria, con el fin de finalizar la combustión de la mezcla rica en combustible que viene de la zona primaria. Debido a que el aire inyectado es más frío que la zona alrededor de la llama, se evita eficazmente que la llama se pegue a las paredes, bajando la temperatura y disminuyendo el estrés térmico. Es necesario un detallado estudio de esta zona con el fin de evitar el fenómeno de apagado de llama.
- **Zona terciaria o de dilución.** Al acabar la combustión, se inyecta parte del aire en esta zona con el propósito de evitar una alta temperatura en las primeras etapas de turbina.

2.3. Acondicionamiento del combustible

Como se ha mencionado a lo largo del documento, el fenómeno de combustión es fundamental para el correcto funcionamiento de los aerorreactores, aunque antes de dicho proceso existen otros relacionados con el combustible que son muy importantes para el resultado final de la combustión. Esta preparación del combustible incluye desde el almacenamiento del mismo hasta los procesos previos a la inyección.

En las configuraciones actuales de las aeronaves, el combustible (típicamente queroseno o derivados) es almacenado en el interior del ala, donde el combustible es presurizado correctamente para luego ser introducido en la cámara de combustión. Sin embargo, esta solución no es viable si se busca usar hidrógeno debido a su baja densidad y consecuentemente el volumen de los tanques necesario es demasiado grande. La solución pasa por almacenarlo en estado líquido, con lo que es necesario tener en cuenta ciertos aspectos. Mantener el hidrógeno en estado líquido no es fácil, debido a que se necesitan altas presiones y muy bajas temperaturas (valores inferiores a $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$). Debido a que es muy complicado mantener el hidrógeno a esas temperaturas, la solución que se propone es aumentar la presión de los depósitos (700 bar) para evitar bajar a esas temperaturas tan extremas, consecuentemente si la presión es tan grande, las sollicitaciones estructurales son más demandantes, con lo cual los tanques deben ser reforzados y por lo tanto pesarán más. Por otro lado, desde el punto de vista del rendimiento de la combustión, inyectar a bajas temperaturas es perjudicial para el proceso [9], [8], lo cual afectará negativamente a las prestaciones del

motor, con el fin de elevar la temperatura del hidrógeno se dispone un intercambiador de calor previo al inyector, consiguiendo que el hidrógeno se inyecte en forma gaseosa. Esto tiene alguna ventaja debido a que deja de ser necesario un atomizador, con lo cual se logra disminuir el tiempo de retraso en la combustión, ya que no existe el proceso de vaporización y por lo tanto el fenómeno de la combustión está gobernado por la difusividad del combustible en el aire.

2.4. Descripción del caso de estudio

El presente trabajo está basado en el estudio y caracterización del proceso de inyección de hidrógeno en un quemador KIAI, donde se puede ver la geometría del mismo en la figura 9. Está formado por una cámara de distribución (plénium) previo al inyector, un inyector tipo *swirler*, la cámara de combustión de forma rectangular y un conducto convergente por donde la mezcla sale del quemador.

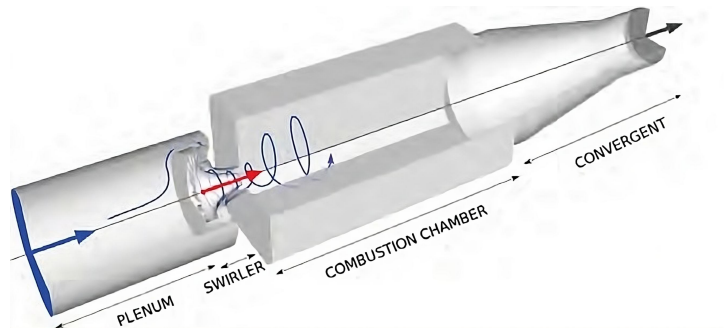


Figura 9: Geometría del quemador KIAI.

El inyector ha sido diseñado por el laboratorio CORIA (*Complexe de Recherche Interprofessionnel en Aérothermochimie*) para el proyecto europeo KIAI (*Knowledge for Ignition, Acoustic and Instabilities*), proyecto del cual se basa la tesis doctoral de M. David Barre [1].

La geometría del inyector, la cual está ilustrada en la figura 10, está formada por una corona de 18 conductos, la cual está situada al final de la cámara de distribución. Los conductos están colocados con una inclinación de 45° con la que se busca favorecer el movimiento de *swirl* y favorecer la mezcla aire-hidrógeno. Los inyectores tipo *swirler* son típicamente empleados en las cámaras de combustión de los motores turbina de gas, con lo cual hay una gran cantidad de casos numéricos y experimentales que han abordado un gran número de estudios sobre el proceso de inyección, los cuales también han servido como guía para la realización del presente documento [13], [17], [2].

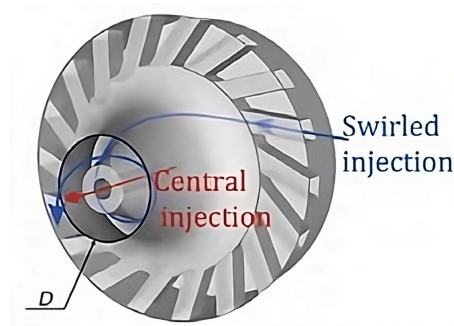


Figura 10: Geometría de la corona del inyector tipo *swirler*.

Ya entrando en más detalle sobre la geometría del conjunto, el combustible es inyectado por un conducto de sección circular de diámetro "d", por otro lado el aire se introduce en la cámara a través de un orificio exterior de diámetro "D", situado de forma coaxial con el inyector del combustible. Por otro lado, la cámara es de geometría rectangular de dimensiones HxL (consultar el cuadro 1). El motivo de usar una geometría simple del quemador es debido a que se busca correlacionar los datos de la simulación con los datos obtenidos de un caso experimental, con lo cual se instalarán ciertos accesos ópticos en forma de ventanas en las caras del quemador, con el fin de estudiar el proceso de combustión.

El estudio se realizará inyectando nitrógeno (N_2), en lugar de aire (aunque la diferencia en términos de resultados no debe variar mucho ya que el aire está formado en su mayoría por nitrógeno, alrededor de un 78 %). Los motivos son varios, en primer lugar el nitrógeno es un gas inerte, con lo cual evitará ciertas reacciones con el hidrógeno, debido a que ambos no reaccionan se podrá estudiar el flujo frío se podrán emplear ciertas técnicas ópticas como el PIV (*Particle Image Velocimetry*), las cuales son técnicas láser que aportan una cantidad de calor que podría encender la mezcla, con lo cual se podrían realizar estudios más profundos sobre otros procesos dentro de la cámara de combustión. Debido a que es complicado determinar todas las propiedades del aire exterior, usar nitrógeno embotellado es positivo ya que sus propiedades son bien conocidas, lo cual permite una mayor precisión lo que consecuentemente permite determinar de mejor forma los resultados del caso.

Parte del quemador	Valor
d (mm)	4
D (mm)	20
H (mm)	100
L (mm)	260

Cuadro 1: Datos específicos del caso de estudio.

Como se ha mencionado en el documento, no sólo es fundamental el estudio de la geometría, sino que también es primordial comprender el comportamiento del flujo a lo largo de la zona de inyección. Dicho esto, existen principalmente tres zonas tal y como puede observarse en la figura 11, las cuales se dividen en:

- **IRZ (*Inner Recirculation Zone*):** es la zona más importante a la hora de diseñar la cámara de combustión, esta zona suele localizarse a lo largo del eje del inyector. La zona se forma principalmente por un gradiente de presiones negativo en la dirección axial haciendo que el flujo retorne y se forme la geometría que se puede ver en la figura 11.
- **CRZ (*Corner Recirculation Zone*):** es la zona que se forma cuando el flujo pasa por una geometría cerrada. El cambio de sección genera la formación de burbujas de recirculación en las zonas cercanas a la salida del inyector y las paredes.
- **PVC (*Precessing Vortex Core*):** es una zona que aparece debido a inestabilidades en la IRZ produciendo oscilaciones del flujo y generando como se puede ver en la figura 11 un estructura tubular que induce una rotación del flujo en la dirección del *swirl* aunque no siempre de forma positiva.

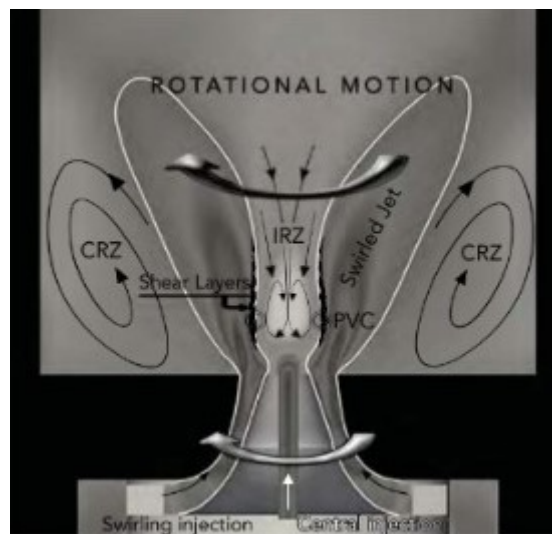


Figura 11: Estructura del flujo en inyectores tipo *swirler*.

La formación de estas zonas son tanto habituales como fundamentales para que se produzca de forma segura la combustión de la mezcla. La formación de esos torbellinos cerca de la zona de inyección permite que la llama aparezca y se estabilice en esa zona. Por otro lado es positiva la formación de dichos torbellinos ya que promueven la transmisión de calor entre gases calientes y mezcla fría, favoreciendo aún más la combustión. Estas estructuras permiten también que la mezcla permanezca un mayor tiempo en la cámara de combustión con lo cual el porcentaje de mezcla que se logrará quemar será aún mayor aprovechando de mejor forma el hidrógeno. Sin embargo una excesiva turbulencia podría ser negativa, debido a que podría evitar el proceso de ignición, podría provocar el retorno de llama (*flashback*) o acabar con el equilibrio de la llama, resultando un proceso de combustión inestable.

3. Metodología CFD

En esta sección se detallan todos los conceptos teóricos relacionados con la preparación del caso, la simulación del mismo y el postproceso mediante la herramienta CFD. Los softwares de CFD están basados en la disciplina de la mecánica de fluidos, ciencia fundamental para comprender casos donde la turbulencia domina el proceso, como ocurre en el presente estudio. De aquí surge la necesidad de emplear estas herramientas CFD, las cuales integran una serie de *solvers*, con el fin de potenciar las simulaciones y acercarse a los procesos termofluidodinámicos reales. Para obtener buenos resultados es necesario conocer por un lado las bases sobre las que se fundamentan dichos softwares computacionales y por otro lado dominar los conceptos físicos para realizar un preproceso eficaz con un coste computacional aceptable.

3.1. Fundamentos CFD

Los softwares CFD son herramientas de cálculo basadas en la discretización del dominio en un número finito de volúmenes, conocido como "malla". En cada una de estas regiones el software resuelve numéricamente todas las variables termofluidodinámicas en el dominio, donde se ha definido previamente al inicio del cálculo una serie de condiciones iniciales y de contorno, lo que permite dar una solución única a las ecuaciones diferenciales que gobiernan los procesos físicos del problema.

3.1.1. Ecuaciones de Navier-Stokes

Como se ha comentado previamente, el software resuelve todas las variables termofluidodinámicas, esto lo consigue resolviendo las ecuaciones de Navier-Stokes en cada volumen finito del dominio, donde ha de cumplirse la conservación de una serie de magnitudes físicas. Estas ecuaciones son:

- **Conservación de la masa:** esta ecuación representa que la cantidad de masa entrante en el sistema es igual a la masa que sale más un término de acumulación. La formulación diferencial de la ecuación se muestra en la ecuación 1.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Donde la densidad del fluido se ha representado por ρ y las tres componentes de la velocidad en coordenadas cartesianas (x, y, z) por (u, v, w).

- **Conservación de la cantidad de movimiento:** esta ecuación en realidad son 3 (una para cada dirección del espacio) y se basan en la aplicación de la segunda ley de Newton a la mecánica de los fluidos, la cual relaciona la variación de la cantidad de movimiento lineal de un volumen de fluido con las fuerzas netas que actúan sobre dicho elemento. Dentro de estas fuerzas se distinguen las fuerzas que actúan de la misma forma sobre cada partícula del volumen como es la fuerza gravitatoria o por otro lado fuerzas superficiales si actúan únicamente en las paredes que encierran el volumen de control, como son las fuerzas de presión, etc. A través de estos conceptos aparecen las

ecuaciones 2, 3 y 4.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla(\mu \nabla u) + F_x \quad (2)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla(\mu \nabla v) + F_y \quad (3)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla(\mu \nabla w) + F_z \quad (4)$$

Donde $\frac{Du}{Dt}$, $\frac{Dv}{Dt}$, $\frac{Dw}{Dt}$ son las derivadas totales de la velocidad en cada una de las direcciones, las fuerzas de presión se han representado por $-\frac{\partial p}{\partial x}$, $-\frac{\partial p}{\partial y}$, $-\frac{\partial p}{\partial z}$, las fuerzas producidas por los efectos viscosos se han representado por los términos $\mu \nabla u$, $\mu \nabla v$, $\mu \nabla w$ y por último las fuerzas másicas por F_x , F_y y F_z .

- **Conservación de la energía:** esta ecuación se basa en el primer principio de la termodinámica, donde los cambios de energía en el sistema son producidos por la suma de calor transmitido con el exterior y el trabajo que realiza el fluido. Escrita de forma diferencial como se puede ver en la ecuación 5.

$$\rho \frac{De}{Dt} = -\nabla(\rho \vec{u}) + \nabla(k \nabla T) + \nabla(u_i \tau_{ij}) + S_e \quad (5)$$

Donde la variación total de energía interna se ha representado por $\frac{De}{Dt}$, el intercambio de calor por conducción por $\nabla(k \nabla T)$, los efectos relacionados con la esfuerzos viscosos por τ_{ij} y por último el término fuente de generación de calor por S_e .

- **Conservación de las especies:** esta ecuación es útil en simulaciones donde se estudia la interacción entre dos o más sustancias fluidas distintas. Esta ecuación establece que en cada uno de los elementos de la malla la acumulación de cada especie se relaciona con la generación y desaparición de la misma. En la ecuación 6 se puede observar su formulación diferencial.

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \nabla(\rho_i \vec{u}) = \nabla(\rho D_i \nabla Y_i) + S_i \quad (6)$$

Donde D_i es la difusión molecular de la especie i , S_i es el término de generación de la especie i , y donde Y_i es la fracción de la másica de la especie i , que se puede definir como se puede ver en la ecuación 7.

$$Y_i = \frac{M_i}{M} = \frac{\rho_i}{\rho} \quad (7)$$

Donde M_i es la masa de la especie i y ρ_i es la densidad de la especie i .

3.1.2. Conceptos de discretización del dominio

Como se ha comentado en anterioridad, los softwares CFD están basados en la discretización, tanto en el espacio como en el dominio temporal, donde la resolución afecta al nivel de precisión de la simulación. En el presente trabajo se estudia el proceso de inyección, el cual es dominado por el fenómeno de la turbulencia, debido a la necesidad de resolver la turbulencia se ha decidido establecer un dominio tridimensional mediante la discretización por el Método de los Volúmenes Finitos. Dicho método consiste en la división del dominio computacional en una serie de celdas de distintas formas, las cuales presentan dos puntos importantes para el cálculo, los cuales son el centroide de cada celda, punto donde se calculan todas las magnitudes de interés y por otro lado los vértices de cada celda donde las variables son interpoladas a través del cálculo en el centroide. Todo este conjunto de celdas que forman el dominio se llama "malla". Como se ha comentado, las celdas pueden presentar distinta geometrías, en el caso de estudio se ha optado por una malla formada por celdas poliédricas, una de las opciones más habituales en simulaciones CFD debido por un lado a la eficacia de estas celdas para adaptarse a dominios morfológicamente complejos y por otro lado porque reducen el coste computacional frente a otras geometrías que se pueden ver en la figura 12.

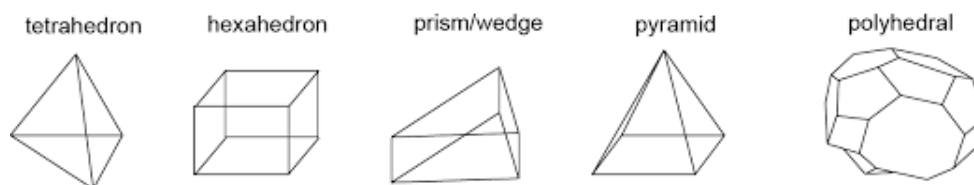


Figura 12: Tipos de celdas según su forma.

En cuanto a la discretización temporal de la simulación, se debe conseguir la estabilidad de la solución, donde se ha tomado para este caso particular una discretización temporal implícita de segundo orden para obtener una mayor precisión. Dicho esto, el salto temporal adoptado ha de estar relacionado con los tiempos característicos del problema de estudio. Otro detalle que se ha de tener en cuenta en simulaciones numéricas es la "Condición de Courant", la cual proporciona una relación entre la discretización temporal y espacial, la cual garantiza la estabilidad de simulaciones numéricas, donde a mayor resolución espacial, mayor ha de ser la temporal o viceversa. Teniendo todo en cuenta, la resolución temporal adoptada para las simulaciones de ambos casos es $\Delta t = 8 \cdot 10^{-7}$ s. El empleo de este paso temporal se ha empleado para evitar problemas de convergencia en la solución.

3.1.3. Modelado de la turbulencia

La turbulencia es un fenómeno tridimensional que aparece en casos de mecánica de fluidos. A diferencia de los flujos laminares, los flujos turbulentos generan un campo fluido complejo de estudiar dominado por fluctuaciones impredecibles y la aparición de estructuras particulares de estos flujos como son los denominados "vórtices". A modo de comparación se muestran ambos flujos en la figura 13, donde se puede ver en la representación de flujo laminar un perfil de velocidad de forma parabólica, mientras que en flu-

jo turbulento se observa un campo de velocidad cuyas líneas de corriente se encuentran desordenadas y forman un perfil caótico.

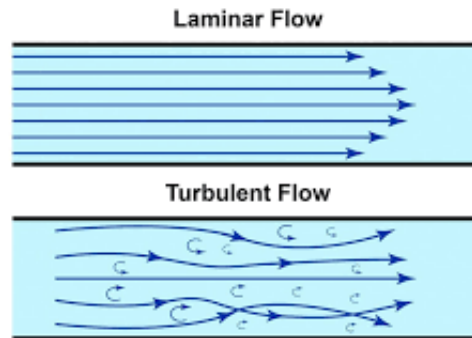


Figura 13: Esquemas de flujo laminar y flujo turbulento.

En mecánica de fluidos existe un número adimensional a partir del cual se puede determinar el régimen en el que se encuentra el flujo, laminar o turbulento. Este se ha definido en la ecuación 8:

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} \quad (8)$$

Viendo la definición del número de Reynolds, este relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas viscosas que afectan al fluido de trabajo. Donde se puede ver que depende de la velocidad media del flujo, L es la longitud característica del problema, que en el presente proyecto es el diámetro de la tubería y μ representa la viscosidad dinámica del fluido. En flujos confinados en paredes como es el caso a tratar, si el número de Reynolds es superior a 4000, se puede decir que el flujo es turbulento. A partir de esta situación en ciertos casos donde el régimen es muy turbulento se pueden despreciar los efectos viscosos, dando lugar a las ecuaciones de Euler [5].

Dependiendo del resultado al que se busque llegar, en CFD existen diferentes formas de definir el tipo de simulación que se busca, lo cual tendrá un efecto sobre el nivel de detalle de los resultados que se obtengan y consecuentemente condicionará el coste computacional de la simulación. Dicho esto existen 3 variantes de abordar las simulaciones en función del nivel de detalle de la escalas de la turbulencia, siendo estas:

- **RANS (Reynolds Average Navier-Stokes)**

Este modelado es el más utilizado dentro de las simulaciones CFD, debido a que ofrece unos resultados rápidos y en ciertas situaciones con un nivel de detalle suficiente con bajo coste computacional. RANS busca obtener resultados haciendo un promediado de Reynolds de las ecuaciones de Navier-Stokes, donde para ello resuelve la simulación modelando todas las escalas turbulentas desde la más pequeña hasta la más grande dentro del dominio, debido a esto los modelos RANS no

son útiles para modelar los procesos transitorios, aunque existen los modelos U-RANS para estos casos concretos. Estos modelos utilizan distintos métodos de resolver los efectos de la turbulencia, lo que se consigue añadiendo nuevas ecuaciones a las ya previamente mencionadas. Dos de los más utilizados son los modelos $k - \epsilon$ y $k - \omega$, los cuales permiten estimar la energía cinética turbulenta (k) y la tasa de disipación de energía cinética turbulenta (ϵ) o la frecuencia específica de disipación (ω) y así estimar las demás variables termofluidodinámicas.

■ LES (Large Eddy Simulation)

Los modelados LES a diferencia de los RANS, permiten obtener un mejor nivel de detalle debido a que se modelan de la misma forma las escalas pequeñas y medianas de la turbulencia pero las escalas grandes se resuelven completamente. Esto como es obvio requiere un mayor coste computacional que RANS al resolver con celdas más pequeñas.

En el presente proyecto se ha optado por una simulación LES entre otros motivos porque la mayor parte de la energía cinética turbulenta se encuentra en las escalas de mayor tamaño, como se puede ver en la "Cascada de Energía Cinética Turbulenta" la cual representa la transformación de energía cinética turbulenta de las escalas grandes a las pequeñas y como estas últimas desaparecen en forma de calor como se puede ver en la figura 14, siendo k el número de onda, la inversa de la dimensión de los torbellinos.

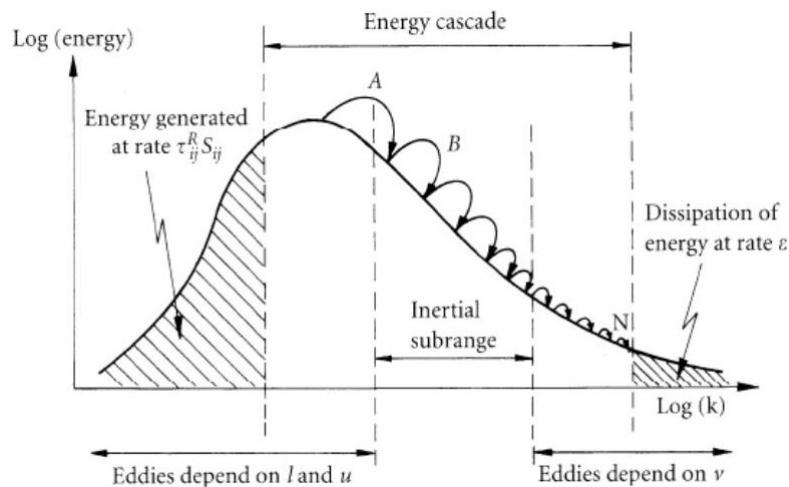


Figura 14: Diagrama de la Cascada de Energía Cinética Turbulenta

Por otro lado, las escalas que no son resueltas de manera directa sino que se simulan caen en la denominada *Sub-Grid Scale* (SGS), donde se simulará con modelos como el de Smagorinsky o el modelo *Wall-Adapting Local Eddy-viscosity* (WALE), lo que afectará a la precisión y calidad de la simulación.

Dicho esto, los modelos LES resuelven directamente las escalas más grandes y gran parte de las

escalas medianas del rango inercial. Esto obliga a emplear modelos como los ya nombrados para modelar la disipación de vórtices en forma de calor, ya que estos procesos son propios de las escalas más pequeñas. A partir de los modelos SGS se puede obtener la viscosidad cinemática turbulenta ν_T . En el presente trabajo se ha empleado el modelo WALE, el cual relaciona la viscosidad cinemática turbulenta con el tensor de deformación de velocidad S_{ij}^d , la dimensión del filtro de la simulación LES Δ_{LES} y una constante C_w . La expresión queda definida en la ecuación 9.

$$\nu_T = (C_w \Delta_{LES})^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{\frac{3}{2}}}{(\overline{S_{ij} S_{ij}})^{\frac{5}{2}} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{\frac{5}{4}}} \quad (9)$$

Donde el tensor de deformación de velocidad S_{ij}^d se puede calcular a través del campo de velocidad como se puede ver en la ecuación 10.

$$S_{ij}^d = \frac{1}{2}(\tilde{g}_{ij}^2 + \tilde{g}_{ji}^2) - \frac{1}{3}\tilde{g}_{kk}^2 \delta_{ij} \quad (10)$$

Donde \tilde{g}_{ij}^2 es el gradiente de velocidad.

La razón de elegir este modelo frente al modelo de Smagorinsky es que ofrece un mejor resultado en zonas de la simulación donde predominan los esfuerzos cortantes.

■ DNS (Direct Numerical Simulation)

Ante los dos modelos explicados anteriormente, los modelos DNS resuelven todas las escalas de la "Cascada de Energía Cinética Turbulenta" desde la más grande a la más pequeña con lo que evita utilizar modelos para resolver la SGS. Como es obvio, resolver toda la simulación sin utilizar modelos mejora la calidad de los resultados pero incrementa demasiado el coste computacional necesitando ordenadores de altísima potencia ya que las celdas son de un tamaño mínimo del orden de la escala de Kolmogorov.

A modo de resumen de los modelos mencionados se puede ver el nivel de detalle que ofrece cada una de las soluciones en la figura 15. Como se puede ver el nivel de detalle de DNS es el más alto, en LES la resolución de las escalas pequeñas disminuye y en RANS no se aprecian los efectos turbulentos.

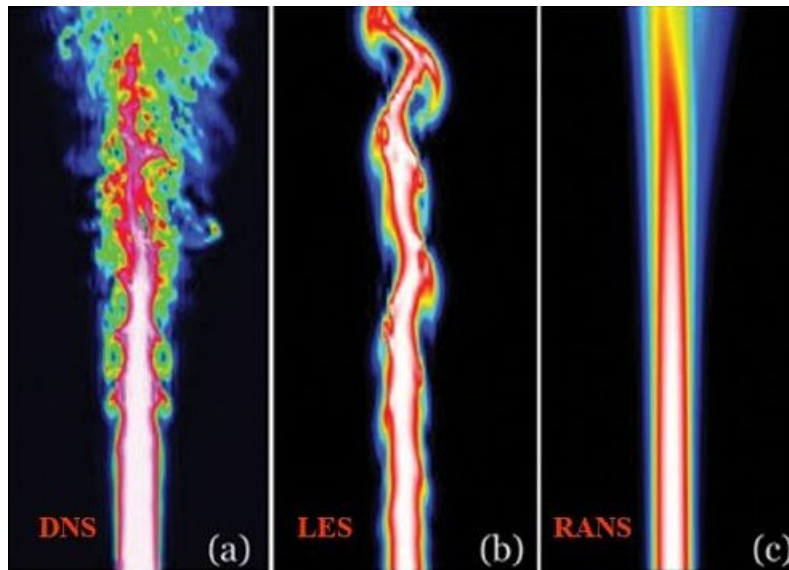


Figura 15: Comparación de resultados mediante modelos DNS, LES y RANS.

3.2. Preproceso del caso

Una vez fijados todos los conceptos previos tratados en el apartado anterior se puede empezar a realizar el preproceso del caso, del cual se hablará en este punto.

El preproceso está basado en definir los modelos y estrategias pertinentes con el fin de abordar la simulación y obtener los mejores resultados. Debido a que no se disponen de datos experimentales para correlacionar la simulación y el caso real es fundamental revisar la bibliografía para comparar resultados con otros trabajos. Como ya se comentó en el apartado 1.5, el presente trabajo continúa el trabajo realizado por A.J. Serrano García [15] el cual se basó en la tesis doctoral de M. David Barre [1], aunque el enfoque de este trabajo consiste en buscar nuevas configuraciones que mejoren los resultados obtenidos, con lo que se intentará comparar los resultados en la medida de lo posible, aunque los resultados que se obtengan no se pueden considerar fieles al caso real hasta que se comparen.

3.2.1. Malla computacional

En primer lugar se establece la geometría del quemador (definida en el apartado 2.4.), con lo cual queda definida una región interna a sus paredes, determinando el dominio computacional del caso. Debido a que se resolverán las ecuaciones de Navier-Stokes en todas las celdas de la malla, el número de celdas afectará sobre el coste computacional total y la dimensión de las mismas la resolución espacial de la simulación obligando a refinar la malla en aquellas zonas donde las variables termofluidodinámicas presentan importantes variaciones y para evitar elevar el coste computacional se reducirá la calidad de la malla en aquellas zonas menos relevantes como se puede ver en la figura 16 donde se ha dividido en 4 zonas. Por

otro lado, el tamaño de las celdas afecta también en el tamaño de las escalas turbulentas que se resolverán numéricamente y por ende definiendo el tamaño de la SGS, como se explicó en el apartado 3.1.3.

A modo de recopilatorio de las características más relevantes de cada zona se muestra en el cuadro 2. Donde el número total de celdas es de 100 mil celdas.

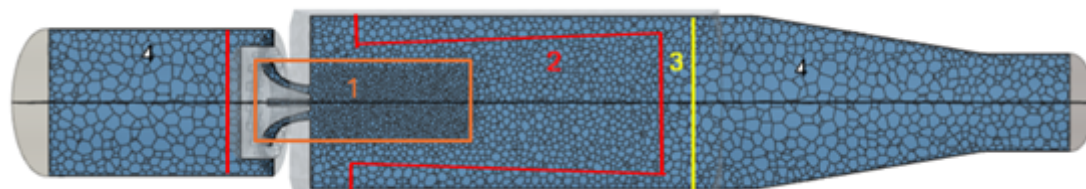


Figura 16: Malla computacional del caso de estudio.

Subregión del mado	Dimensión del elemento	% del tamaño base de malla
Zona 1	0,9 mm	10 %
Zona 2	3,6 mm	40 %
Zona 3	6,3 mm	70 %
Zona 4	9 mm	100 %

Cuadro 2: Características de la malla computacional y sub-regiones de la malla.

3.2.2. Condiciones de contorno

En simulaciones CFD las condiciones de contorno se establecen en cada superficie del dominio, lo que permite establecer distintas configuraciones para la misma geometría.

Existen distintas condiciones de contorno que se pueden imponer. Dicho esto, para este trabajo se han impuesto tres tipos de condiciones de contorno diferentes. En primer lugar, se ha impuesto el gasto másico de nitrógeno (N_2) en la región "plenum inlet" y también se ha impuesto el flujo másico de hidrógeno (H_2) en la región "central inlet". En segundo lugar, en simulaciones CFD se suele imponer la presión de salida y en este trabajo también se ha impuesto la presión de salida como constante e igual a la presión atmosférica en la región "outlet" y por último el resto de regiones se han configurado como paredes adiabáticas debido a la poca importancia de los fenómenos de conducción térmica en el flujo frío.

Como ya se comentó en el apartado 1.5, el presente trabajo busca encontrar una mejor condición de operación para la inyección de hidrógeno que la que se propuso en el trabajo de A. J. Serrano [15]. Por ello, se estudiarán dos configuraciones, donde se varía la región por la que se inyecta el combustible, siendo el dosado de ambos casos de 0,6. En el caso 1, el hidrógeno es inyectado por la región "central inlet", mientras que en el caso 2 el combustible es inyectado por la región "plenum inlet". En los cuadros 3 y 4 se muestran más detalles de las condiciones de contorno de ambos casos de estudio.

Paredes	
T [K]	300
Especificación	Adiabática sin deslizamiento

Cuadro 3: Detalles de la condición de contorno de las paredes.

Condiciones de inyección				
	Plenum inlet caso 1	Plenum inlet caso 2	Central inlet caso 1	Central inlet caso 2
\dot{m}_{N_2} [kg/s]	$56,12 \cdot 10^{-4}$	0	0	$56,12 \cdot 10^{-4}$
\dot{m}_{H_2} [kg/s]	0	$33,672 \cdot 10^{-4}$	$33,672 \cdot 10^{-4}$	0
T [K]	300			
p [Pa]	101325			
Y_{H_2} [-]	0	1	1	0
Y_{N_2} [-]	1	0	0	1

Cuadro 4: Detalles de las condiciones de contorno de "plenum inlet" y "central inlet" para los casos 1 y 2.

3.2.3. Condiciones iniciales

Del caso a estudiar, el presente trabajo busca centrarse en el estudio del estacionario, obviando el estudio transitorio de la inyección. Para definir bien el caso en el software CFD, es necesario imponer unas condiciones iniciales para calcular la simulación. Las condiciones iniciales que se han decidido establecer son las mismas en todo el dominio, estableciendo que dentro del dominio la composición másica está formada completamente por nitrógeno puro en condiciones ambiente y partiendo del reposo, recogiendo estos datos en el cuadro 5.

Condiciones iniciales	
T [K]	300
p [Pa]	101325
Y_{H_2} [-]	0
Y_{N_2} [-]	1
M [-]	0

Cuadro 5: Detalles de las condiciones iniciales.

3.3. Postproceso del caso

En este apartado se realizará el análisis y el procesamiento de los resultados obtenidos a través de las simulaciones. En esta sección se muestran las técnicas empleadas para interpretar los resultados, así como los criterios determinados para validar dichos cálculos computacionales.

3.3.1. Análisis transitorio

En el presente trabajo se desarrolla la inyección de hidrógeno y el proceso de mezcla del mismo con el nitrógeno. Dicho proceso posee un carácter transitorio en las primeras instantes de la inyección. El proceso de inyección tiene un carácter turbulento, el cual es en si mismo transitorio en el tiempo, dificultando el análisis de las estructuras turbulentas, ofreciendo unos resultados no concluyentes sobre el proceso continuo del quemador. A pesar de ello, el proceso de inyección en un cierto instante se vuelve estable y se puede considerar que se ha alcanzado el estado "estacionario" [16].

El "estacionario" se determinará analizando la evolución a lo largo del tiempo de unas magnitudes físicas en 4 puntos. Los detalles de los puntos de control se detallan en el cuadro 6 y se visualizan en la figura 17.

Punto	x	y	z
1	0	0	D
2	0	1.5D	D
3	0	0	3D
4	0	1.5D	3D

Cuadro 6: Detalles de los puntos de control para analizar el transitorio.

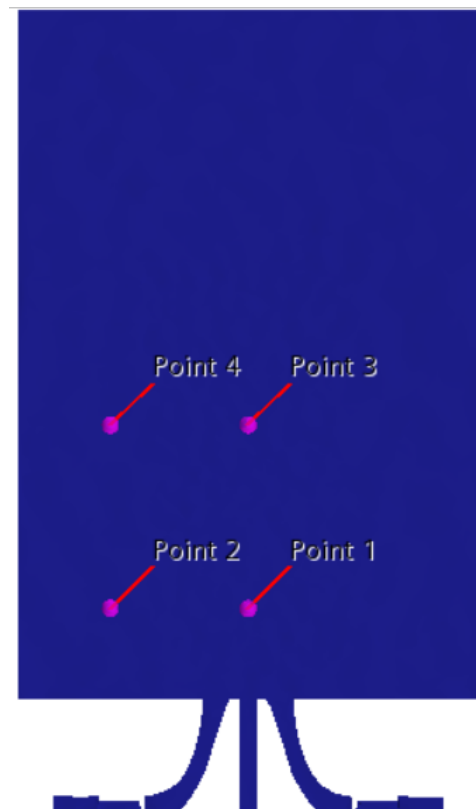


Figura 17: Puntos de control para analizar el transitorio.

En estos puntos de control se registran distintas variables a lo largo del tiempo, en este trabajo se analizará la concentración de hidrógeno $[H_2]$ y la presión relativa $\Delta_P = p - p_{amb}$.

Para realizar el análisis estadístico se realizará un análisis ANOVA donde se establecen tres ventanas temporales (V1, V2 y V3) donde se analiza la media y la varianza entre las poblaciones de las distintas ventanas como se puede ver en la figura 18. Una vez realizado el análisis ANOVA si no existen diferencias significativas entre las medias de las distintas series de datos se puede concluir que se ha alcanzado el estacionario desde el inicio de la ventana V1. La hipótesis nula que se establece es que la media de las distintas ventanas temporales son iguales y por lo tanto la hipótesis alternativa es que las medias son distintas. Si el nivel de significancia es mayor a un 5 %, se concluye que existen evidencias significativas para aceptar la hipótesis alternativa y viceversa.

Realizando ambas simulaciones se muestran en las figuras 19, 20, 21 y 22, la evolución de las variables de control en los puntos de control establecidos de ambas simulaciones.

Observando ambos casos, se aprecian varias diferencias entre ambos casos. En primer lugar, las figuras 19 y 20 muestran la evolución temporal de la concentración volumétrica de hidrógeno en los 4 puntos de control, donde se puede ver que para el caso 1, la concentración volumétrica de hidrógeno no para de crecer en los 4 puntos de control, hasta que el hidrógeno alcanza valores cercanos a 1 o lo que es lo mismo que todo el hidrógeno inyectado ha desplazado el nitrógeno dentro de la cámara. Por otro lado, en la figura 20 se puede ver un cierto retraso hasta que el hidrógeno llega a los 4 puntos de control, debido a que la velocidad del hidrógeno inyectado por el "plenum inlet" es demasiado lenta. A partir de ese instante, se pueden ver grandes oscilaciones de la variable a lo largo del tiempo en los 4 puntos, pero el promedio de la concentración volumétrica de hidrógeno en los puntos es baja (menor de 0,1 en los 4 puntos). En cuanto a la variable de presión relativa, en relación al primer estudio (figura 21), se puede ver un aumento de la presión relativa en los 4 puntos en los primeros instantes, pero rápidamente se estabilizan en un valor entorno a la presión atmosférica ($\Delta_P = 0$). Sin embargo observando la figura 22 se puede ver de igual forma una gran oscilación en los primeros instantes de la simulación, pero en este caso y a medida que se aproxima el estacionario se puede ver como la señal muestra la formación de un gradiente de presiones adverso.

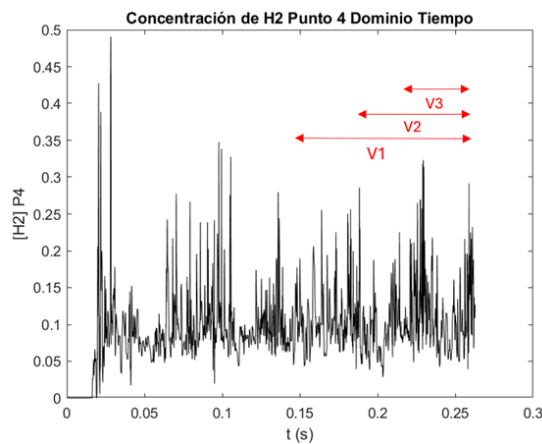


Figura 18: Análisis del estacionario de la señal mediante el ANOVA.

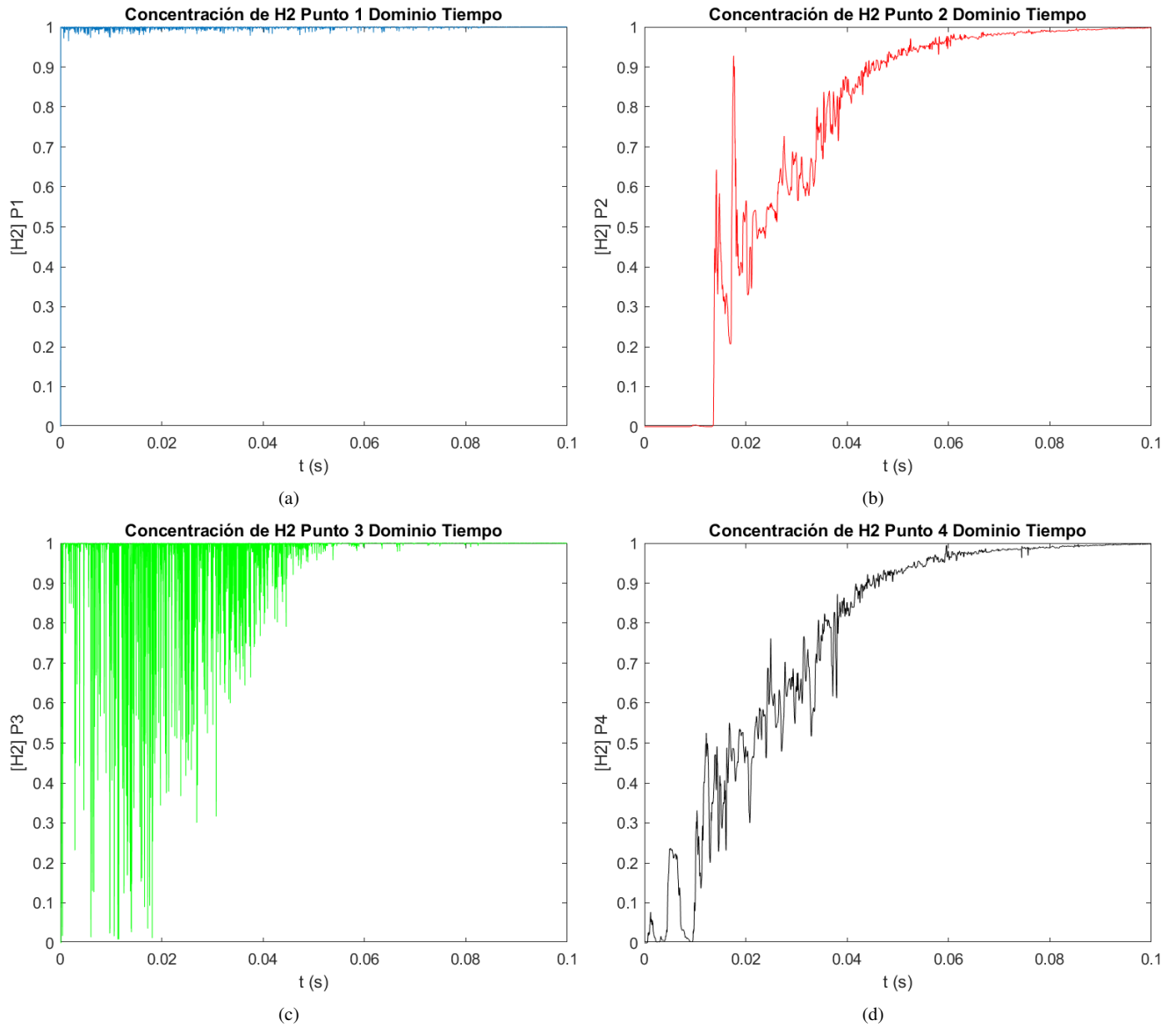
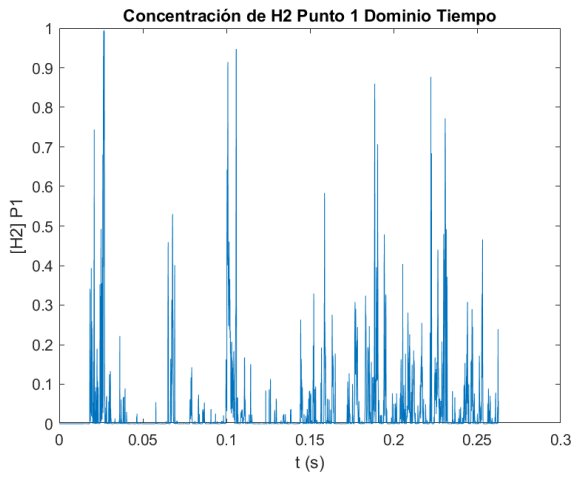
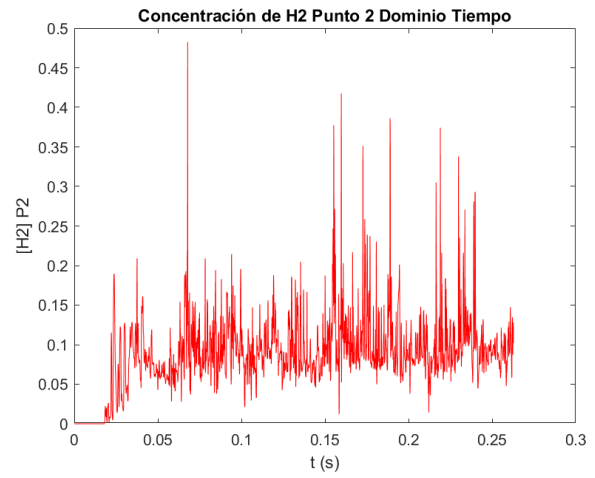


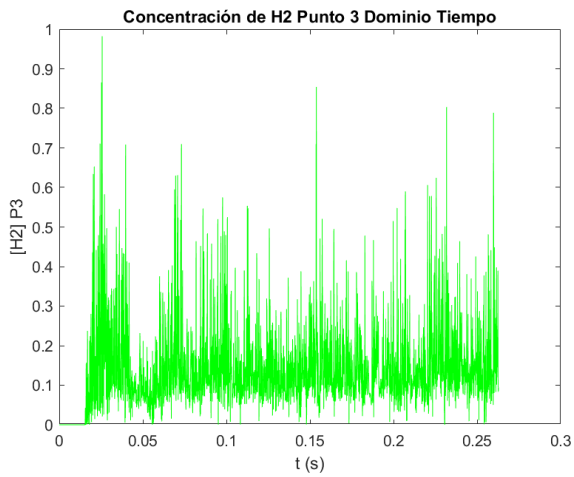
Figura 19: Evolución de la concentración de hidrógeno en los puntos de control (Caso 1).



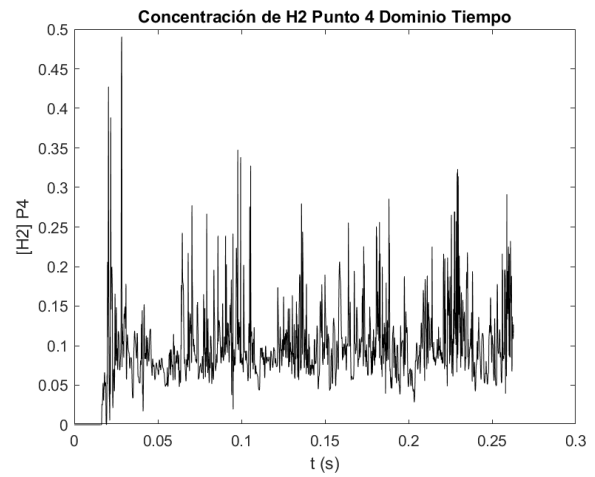
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 20: Evolución de la concentración de hidrógeno en los puntos de control (Caso 2).

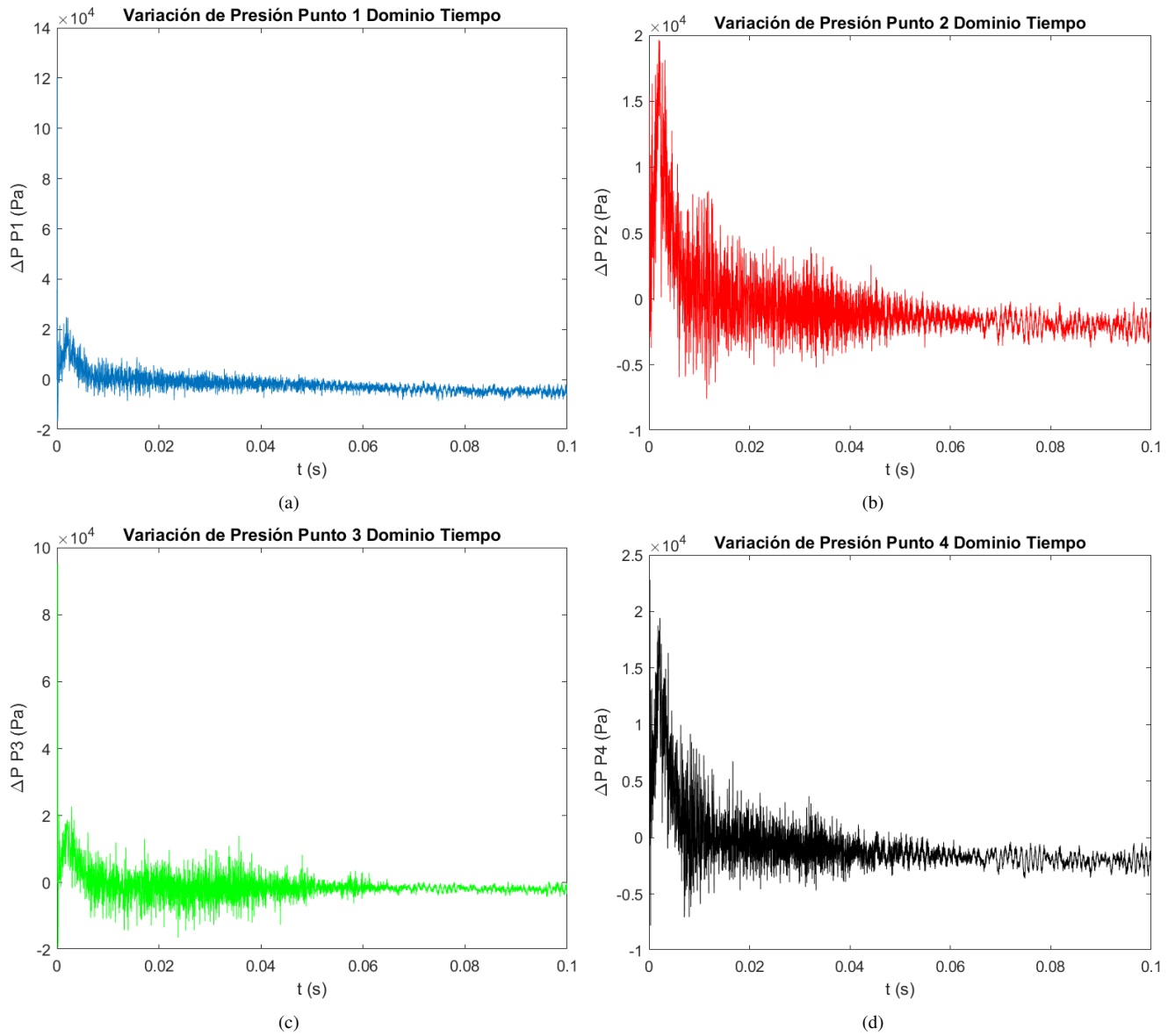


Figura 21: Evolución de la presión relativa en los puntos de control (Caso 1).

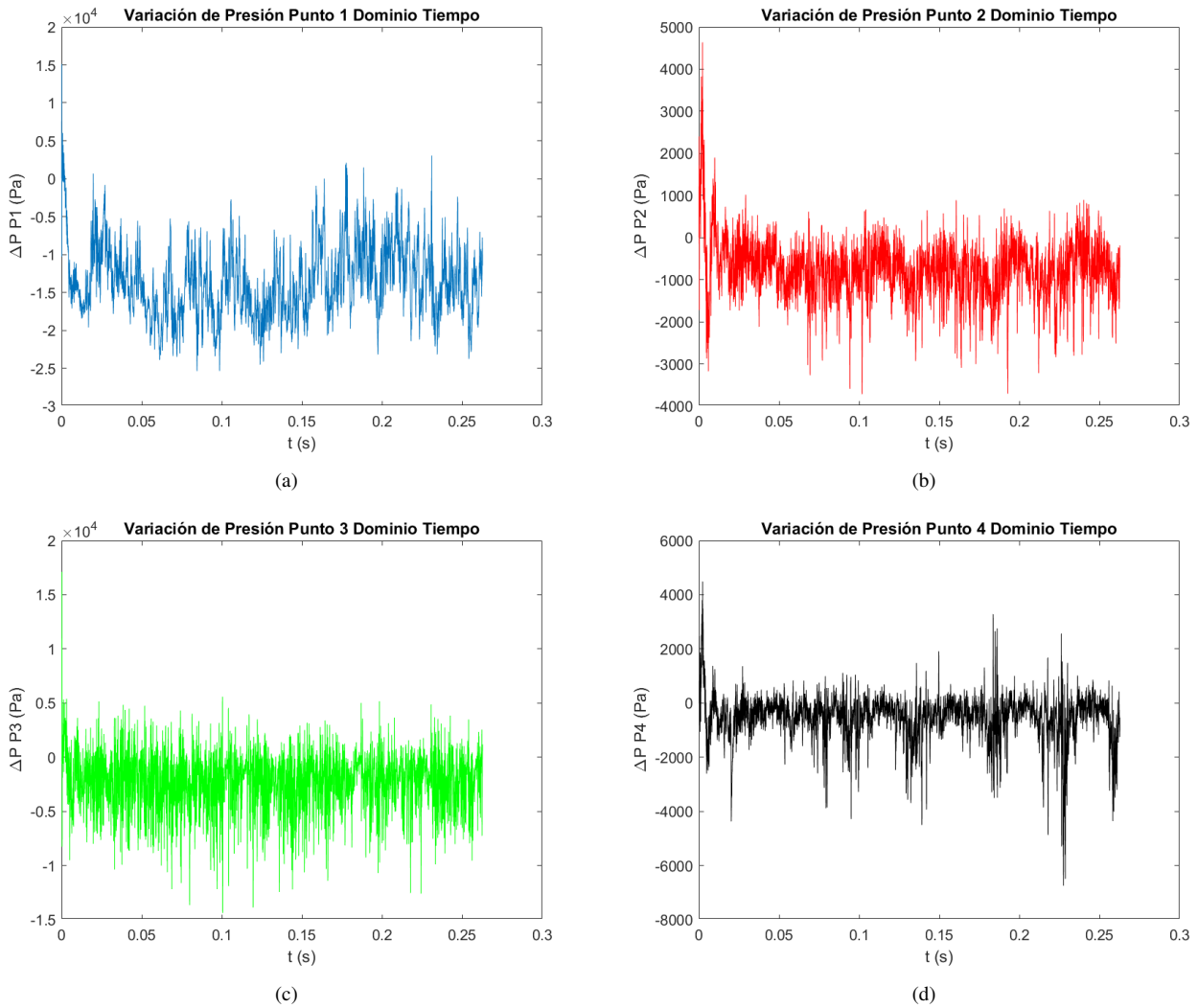


Figura 22: Evolución de la presión relativa en los puntos de control (Caso 2).

3.3.2. Análisis en frecuencia

Debido a los múltiples factores que afectan al proceso de inyección, conocer con mucha precisión aspectos tan importantes como la estabilidad de la llama se vuelve muy complicado. Con el fin de validar los resultados obtenidos, se muestra en las figuras 23 y 24 una comparación de las frecuencias dominantes entre los casos y los resultados obtenidos de otros ensayos y proyectos [1] y [15].

Un factor clave en estos procesos de inyección es el número de Swirl (S), un factor adimensional que relaciona la velocidad tangencial U_θ y la velocidad axial U_z , como se puede ver en la ecuación 11. En el cuadro 7 se han calculado los valores de número de Swirl para los dos casos de estudios.

$$S = \frac{U_{\theta}}{U_z} \quad (11)$$

	S
Caso 1	0,055
Caso 2	0,13

Cuadro 7: Valores de número de Swirl para los casos de estudio en $z=0,25D$ sobre el eje de inyección

Según la bibliografía [1], [6], valores superiores a 0,5 o 0,6 garantizan la generación de estructuras turbulentas como el PVC y el IRZ propias de estos casos de inyección, detalladas en la sección 2.4. y como se puede ver en el cuadro 7, los valores son bajos lo que afectará a la formación de estructuras turbulentas, en el caso 1 la IRZ y PVC y en el caso 2 la IRZ como se mostrarán en los siguientes puntos. Pese a ello, no es posible pronosticar conocidas las condiciones de contorno el desarrollo de la PVC, debido a su gran intensidad turbulenta y por tanto la zona de mayores problemas de estabilidad de la mezcla y soplado de llama. Es por ello que se vuelve necesario comparar los resultados obtenidos con ensayos experimentales, comparando las frecuencias dominantes del proceso.

Para obtener las frecuencias dominantes del proceso se ha empleado la Transformada Rápida de Fourier (FFT) sobre la variable de concentración volumétrica de hidrógeno en el punto 1, siendo la FFT una herramienta matemática que permite extraer el contenido en frecuencia de la señal. Todo ello permite concluir que el análisis es válido. De acuerdo a los resultados de aplicar la FFT se pueden observar que las frecuencias dominantes de ambos casos (caso 1 entorno a los 180 Hz y caso 2 entorno a los 240 Hz), se encuentran casi en un orden de magnitud más bajo que en la bibliografía mostrada (figura 24), esto se puede deber a que el la velocidad de inyección de los casos de estudio 1 y 2 es aproximadamente un orden de magnitud superior y observando la evolución de la FFT se pueden ver picos de frecuencia importantes hasta los 3000 Hz aproximadamente, de igual forma que se puede ver en la figura 24.

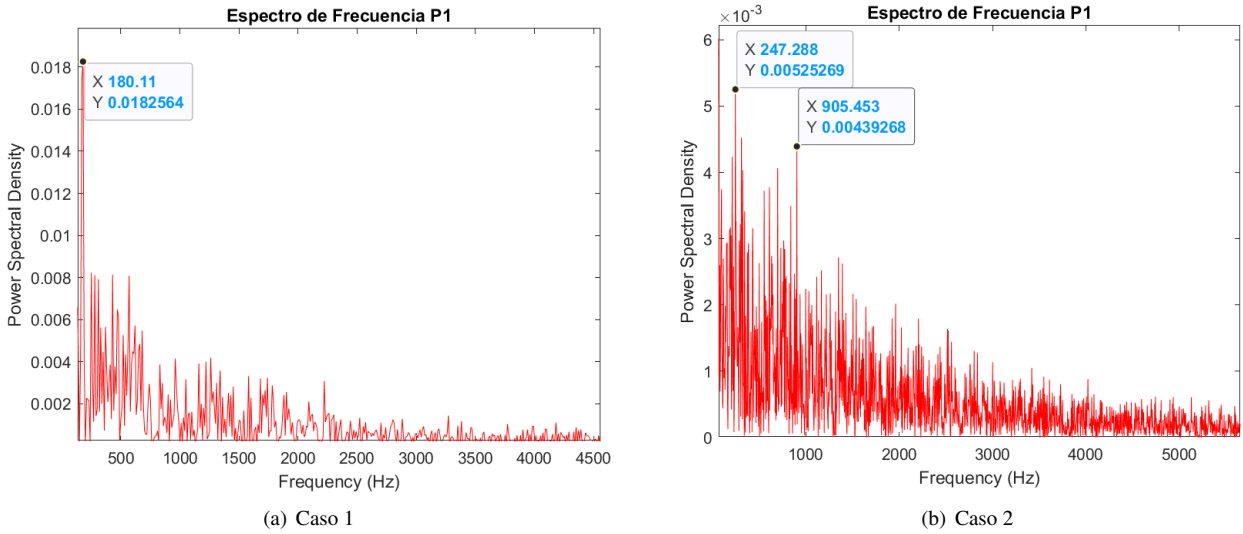


Figura 23: Espectro de frecuencia del caso 1 (a) y caso 2 (b).

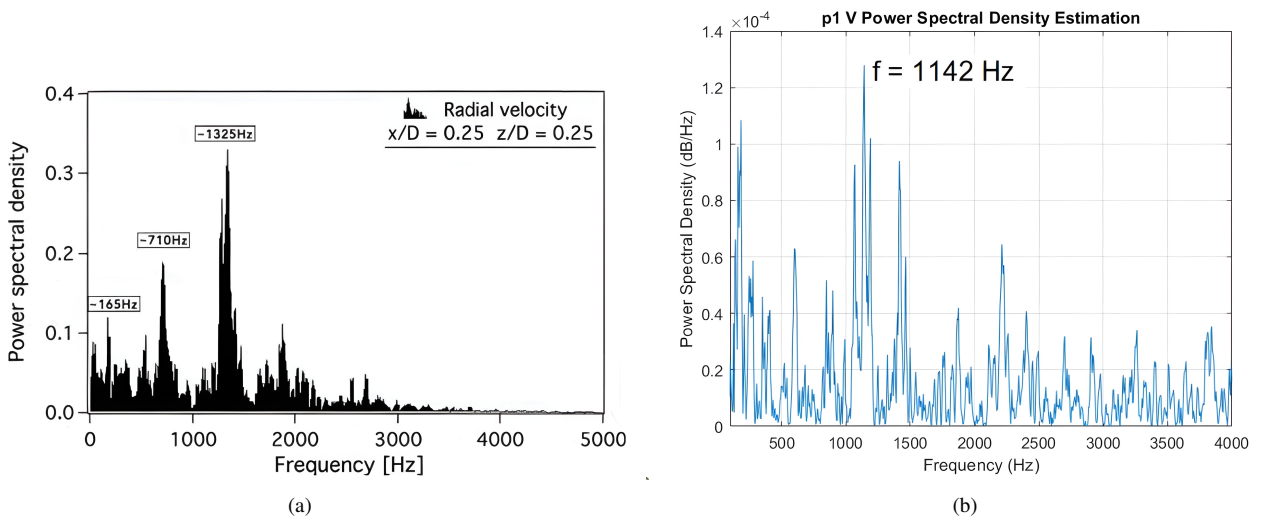


Figura 24: Espectros de frecuencia de casos similares encontrados en la bibliografía.

3.3.3. Índices de calidad en LES

Tras la realización de las simulaciones es posible corroborar si los resultados de la simulación LES tiene un nivel suficiente de detalle en el cálculo de las variables turbulentas tanto en la zona resuelta numéricamente como la modelada en la SGS. Esto se realiza con una serie de índices de calidad tal y

como se recoge en [3].

■ **Índice basado en la viscosidad turbulenta**

Este índice permite estimar la aportación de la viscosidad modelada en la SGS ν_T , definida en el apartado 3.1.4 en relación a la viscosidad del fluido ν . En la ecuación 12 se puede ver como se ha definido el índice, donde aparecen una serie de constantes $\alpha_\nu = 0,05$ y $n = 0,53$, los cuales se determinan a través de simulaciones DNS. La calidad de este índice sobre la simulación de este trabajo se puede ver en las figuras 25 y 26.

$$LES_IQ_\nu = \frac{1}{1 + \alpha_\nu \left(\frac{\nu_T + \nu + \nu_{LES}}{\nu} \right)^n} \tag{12}$$

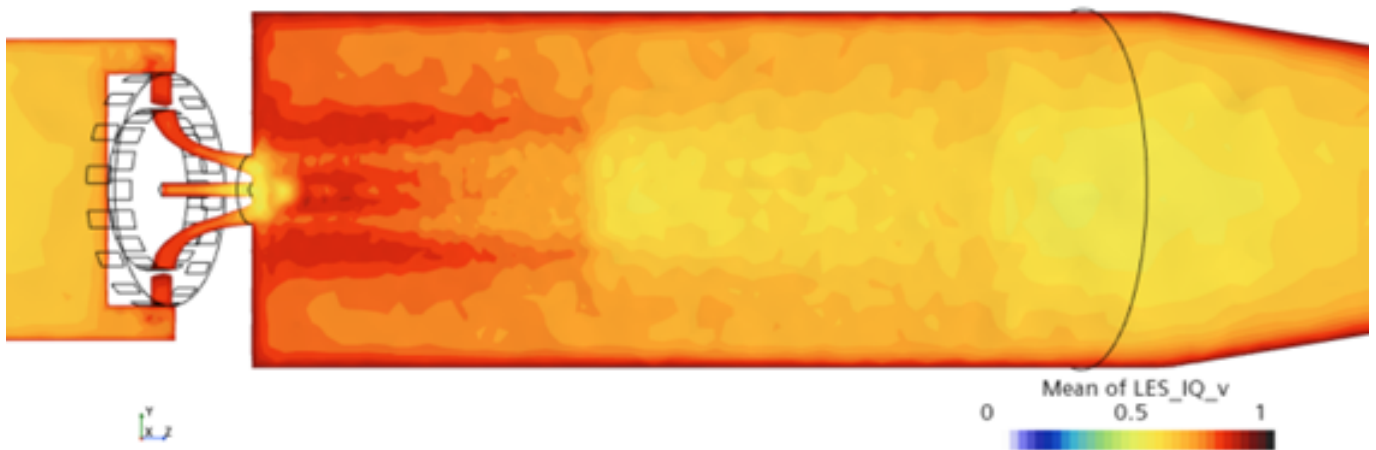


Figura 25: Media temporal del índice LES_IQ_ν en el plano $[x=0]$ (caso 1).



Figura 26: Media temporal del índice $LES-IQ_v$ en el plano $[x=0]$ (caso 2).

■ **Índice basado en la resolución de la malla computacional**

Este índice realiza una comparación entre la dimensión resuelta en la simulación LES con un cálculo de la escala de Kolmogorov (zona de mayor número de onda en la Cascada de Energía Cinética Turbulenta). El índice es definido a través de la ecuación 14, donde de nuevo aparecen otras constantes, como son $\alpha_\eta = 0,05$ y $m = 0,5$. Por otro lado en la ecuación 13 se define la escala de Kolmogorov. La calidad de este índice sobre la simulación de este trabajo se puede ver en las figura 27 y 28.

$$\eta = \left(\frac{\mu^3}{w^3} \right)^m \quad (13)$$

Donde l_t es la escala integral.

$$LES-IQ_\eta = \frac{1}{1 + \alpha_\eta \left(\frac{\Delta_{LES}}{\eta} \right)^m} \quad (14)$$



Figura 27: Media temporal del índice LES_{IQ_η} en el plano $[x=0]$ (caso 1).



Figura 28: Media temporal del índice LES_{IQ_η} en el plano $[x=0]$ (caso 2).

■ Índice basado en la resolución de la turbulencia

Este índice permite evaluar la calidad de la solución, la bibliografía apunta que la energía cinética turbulenta debe ser resuelta al menos en un 80 % para asumir una buena calidad en la zona de mayor interés, que en nuestro caso ha sido mallada de una forma más fina para obtener la mayor precisión posible [4].

Este índice está definido como la relación entre la energía cinética turbulenta resuelta y la energía cinética turbulenta total. Los resultados para el caso de estudio se han mostrado en las figuras 29 y

30 . La formulación de esta variable queda definida en la ecuación 15.

$$LES_IQ_k = 1 - \frac{|k_{tot} - k_{res}|}{k_{tot}} \quad (15)$$

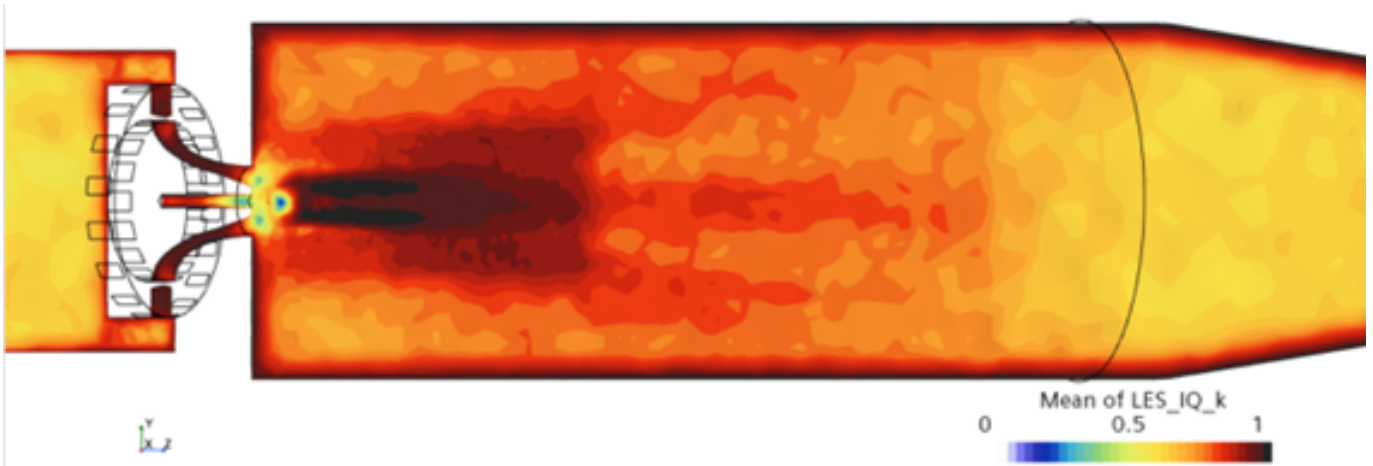


Figura 29: Media temporal del índice LES_IQ_k en el plano $[x=0]$ (caso 1).



Figura 30: Media temporal del índice LES_IQ_k en el plano $[x=0]$ (caso 2).

Observando la calidad de este índice en el caso de estudio 1, se puede ver que en la zona cercana a la inyección el nivel de resolución es bastante alto como se puede ver alrededor del 80 % salvo en una zona donde la calidad es muy baja entorno al 25 %. Por otro lado, en el resto de zonas lejanas a la zona cercana a la inyección, el índice toma valores entorno al 60 %. Por otro lado, viendo el índice en el caso 2, se puede ver como en la zona cercana de la inyección se tiene una muy baja calidad entorno al 20 %, mientras que

en la mayor parte de la cámara se pueden ver valores superiores al 60 % en toda la cámara. Dicho esto, se puede concluir que el nivel de resolución es inadecuado y sería necesario aumentarlo disminuyendo el tamaño de las celdas y consecuentemente incrementando el coste computacional. El aumento del tiempo de cálculo se encuentra fuera de los objetivos del presente trabajo.

4. Síntesis de resultados

En este apartado se realizará un desarrollo de los resultados obtenidos de las simulaciones, el análisis se realizará teniendo en cuenta que el coste computacional utilizado no permite resolver la energía cinética turbulenta suficiente, lo que afectará a los resultados de los estudios haciendo que sean más difusivos que el caso real. Una vez se ha demostrado la estacionariedad de la simulación mostrado en el punto 3.3.1., los resultados recogidos comprenden una situación de operación continua del quemador y por tanto el rendimiento del mismo.

El trabajo como se ha comentado, continua el proyecto [15] con lo cual se busca optimizar el proceso de inyección. Para realizar la comparación se mostrarán los resultados de ambas simulaciones descritas en la sección 3.2.2., donde se irán comentando los puntos más importantes.

4.1. Estudio del caso 1

4.1.1. Estudio de los campos de velocidades

La simulación de los distintos casos permite mostrar el campo fluido dentro de la región de estudio, lo que ofrece una mayor comprensión del perfil de velocidades y de las tres componentes de la velocidad con el fin de comparar con los datos del ensayo experimental en ciertos puntos de interés.

A continuación se muestran en las figuras 31, 32 y 33 se muestran el promedio de toda la simulación de las distintas componentes de la velocidad y el promedio del RMS (*Root Mean Square*) de las fluctuaciones de esas mismas componentes de la velocidad.

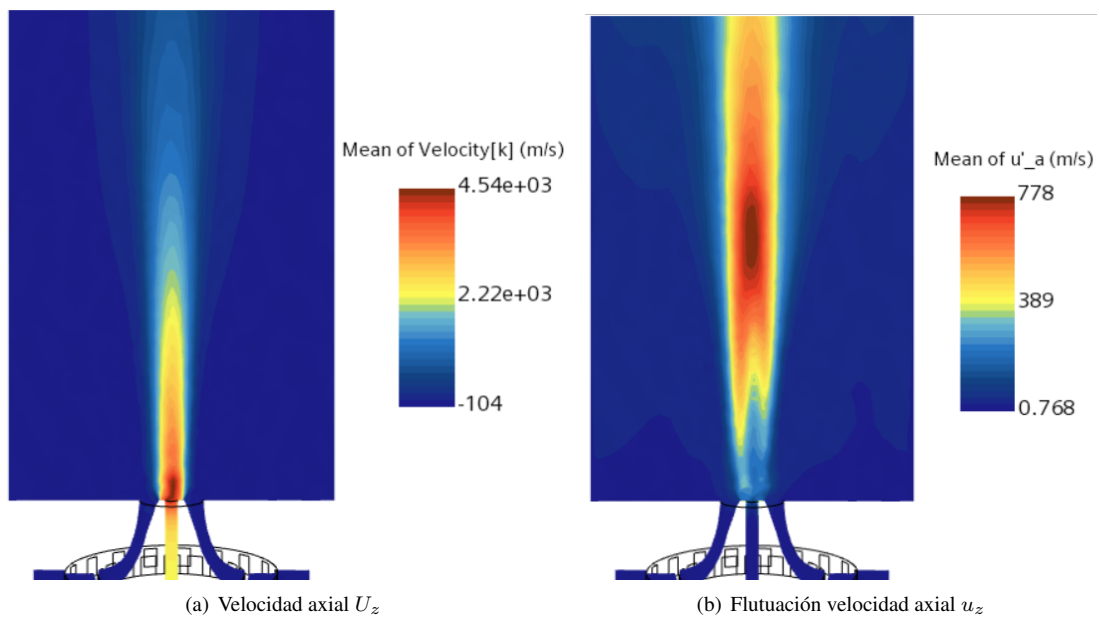


Figura 31: Promediado de velocidad axial U_z (a) y fluctuaciones de la velocidad axial u_z (b) del caso 1.

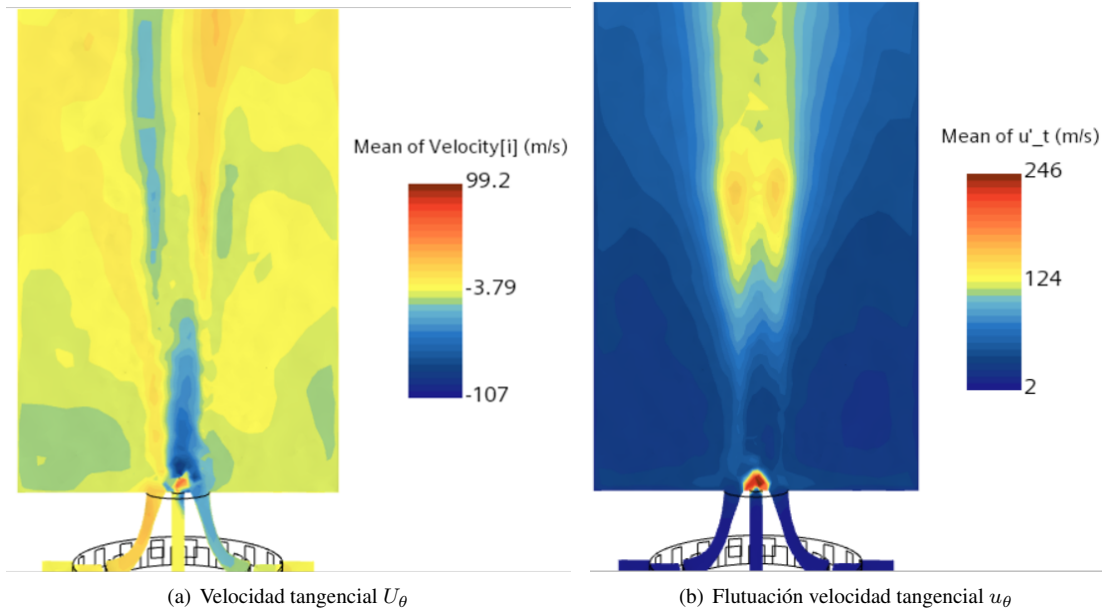


Figura 32: Promediado de velocidad tangencial U_θ (a) y fluctuaciones de la velocidad tangencial u_θ (b) del caso 1.

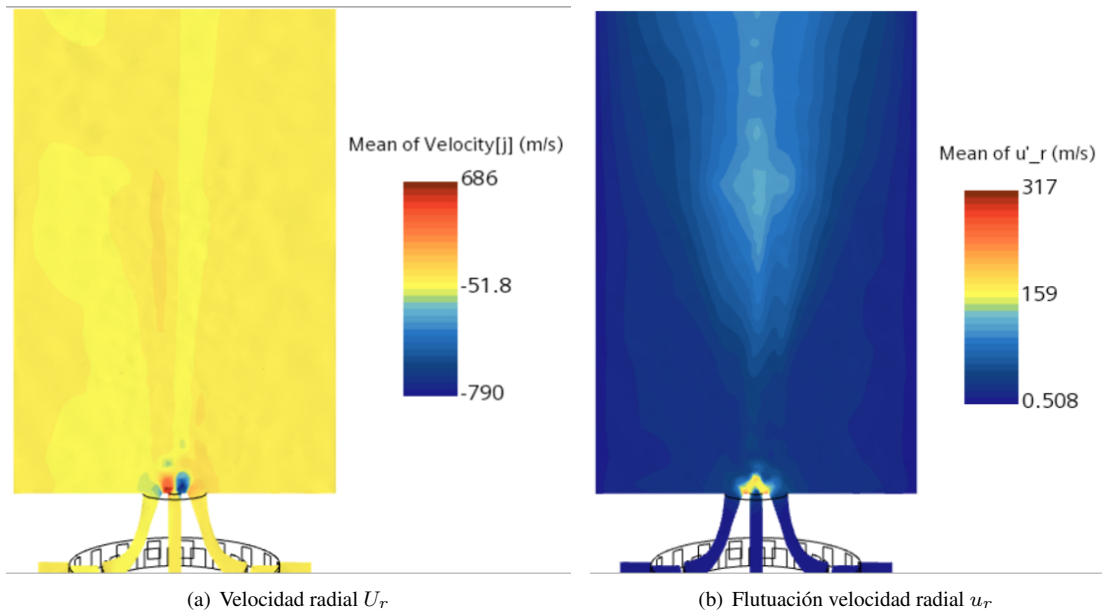


Figura 33: Promediado de velocidad radial U_r (a) y fluctuaciones de la velocidad radial u_r (b) del caso 1.

Como se puede ver en la figura 31 (a), en la zona cercana a la inyección existen velocidades axiales

muy altas superando condiciones supersónicas. Observando las figuras 32 (a) y 33 (a) se aprecian valores máximos absolutos demasiado bajos en comparación con los valores de velocidad axial, factor principal que impide la formación de las ya nombradas estructuras turbulentas, aún así el signo de las componentes tangenciales y radiales son los esperados tal y como se han visto en los documentos bibliográficos consultados. En cuanto a los valores de RMS de las componente axial (figura 31 (b)) son muy altos en la mayor parte de la cámara lo que impedirá que se ancle la llama en un hipotético proceso de combustión. En cuanto a los valores de RMS de la componente tangencial y radial (figura 32 (b) y 33 (b) respectivamente) son también bastante elevados y se puede ver que las mayores fluctuaciones aparecen cerca de la salida del inyector central, lo que de nuevo supondría un factor negativo a la hora de formar las estructuras turbulentas centrales.

4.1.2. Estudio del proceso de mezcla

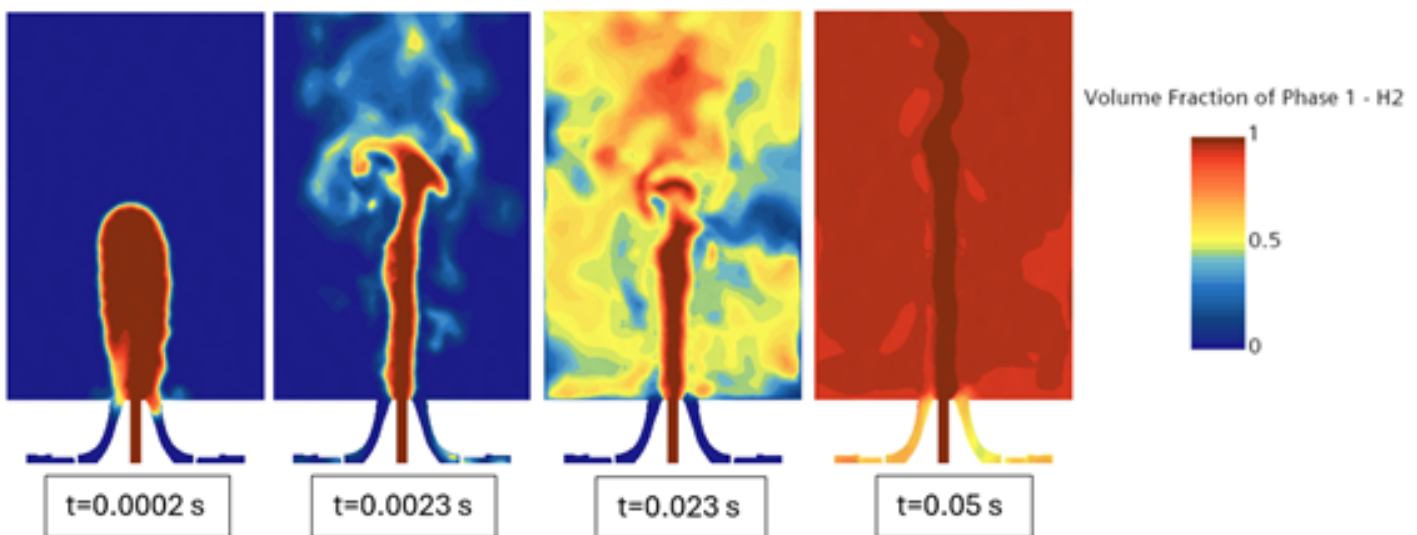


Figura 34: Evolución del proceso de mezcla (caso 1).

Como se puede ver en la figura 34, en los instantes iniciales se aprecia una gran zona de alta concentración de hidrógeno. A medida que va pasando el tiempo, la concentración general de la cámara se vuelve cada vez más homogénea hasta que llega a un instante en el que el hidrógeno desplaza por completo todo el nitrógeno que se encuentra en la cámara.

Esto se puede apreciar en la figura 19 (Post-Proceso) donde se puede ver que a lo largo del tiempo los 4 puntos de control alcanzan un nivel de concentración de hidrógeno casi total. Como se puede ver en la última imagen de la figura 34 el hidrógeno entraría hasta en los inyectores por donde se introduce el nitrógeno, este hecho y todo lo comentado anteriormente justifica la realización de un segundo caso con una menor velocidad de inyección.

4.2. Estudio del caso 2

Debido al estudio previo y de acuerdo a los resultados del caso 1, es necesario disminuir la velocidad de inyección de hidrógeno con el fin de evitar que la cámara se llene de hidrógeno "expulsando" el aire de la cámara y por otro lado favorecer las estructuras turbulentas comentadas en la sección 2.4. Con el fin de conseguir unos resultados más cercanos al caso 1, sería necesario aumentar el diámetro de inyección de hidrógeno aproximadamente unos 8 cm. Debido a que se aumento supone un diámetro de inyección que no cabe en la geometría actual, con lo cual se decide intercambiar las entradas de las dos especies.

4.2.1. Estudio de los campos de velocidades

De igual forma que en el apartado 4.1.1. se muestra a continuación en las figuras 35, 36 y 37 las componentes de la velocidad y las fluctuaciones de esas componentes en la cámara.

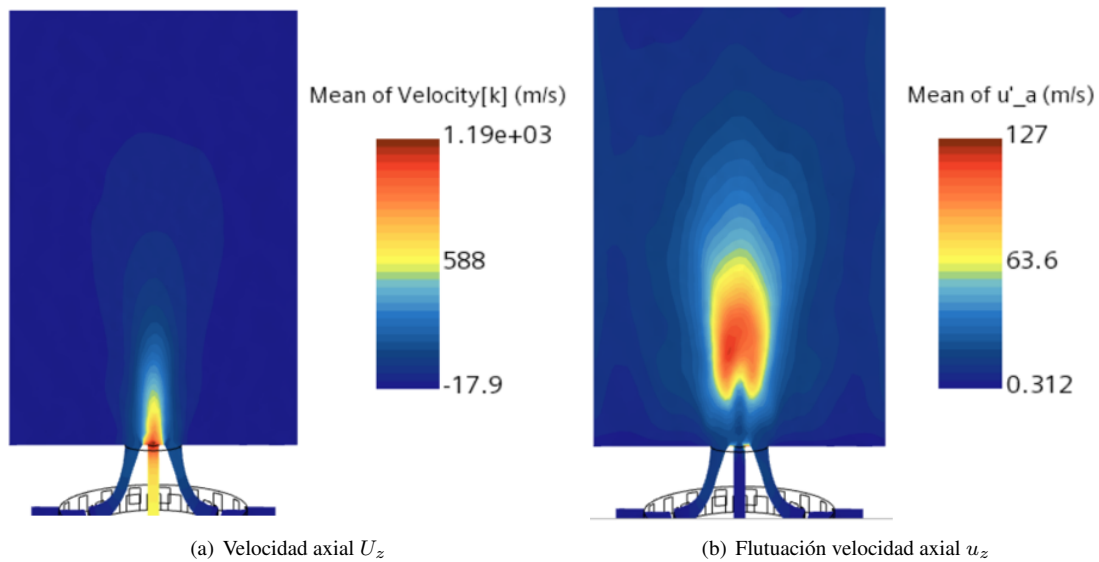


Figura 35: Promediado de velocidad axial U_z (a) y fluctuaciones de la velocidad axial u_z (b) del caso 2.

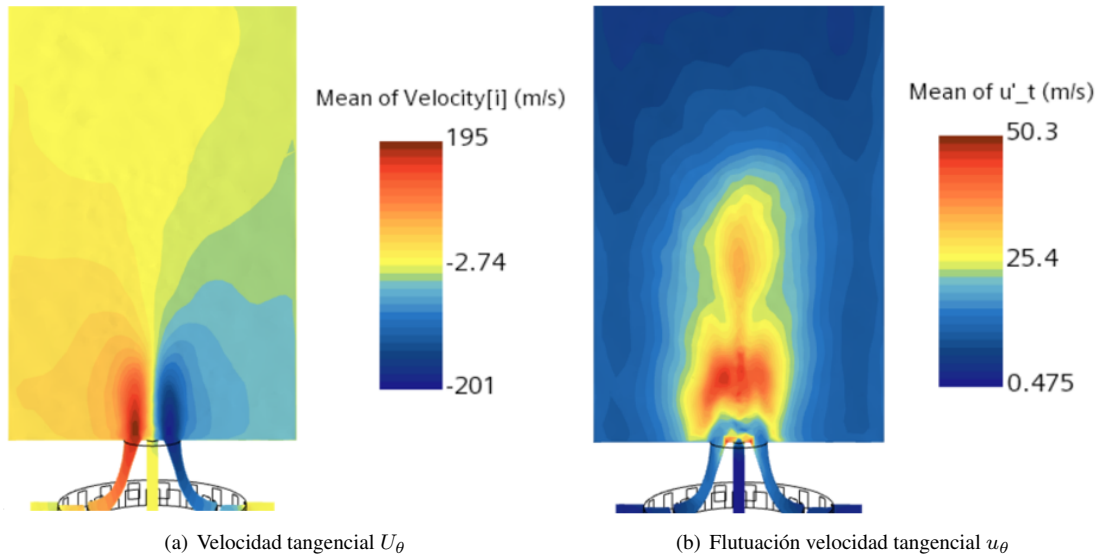


Figura 36: Promediado de velocidad tangencial U_θ (a) y fluctuaciones de la velocidad tangencial u_θ (b) del caso 2.

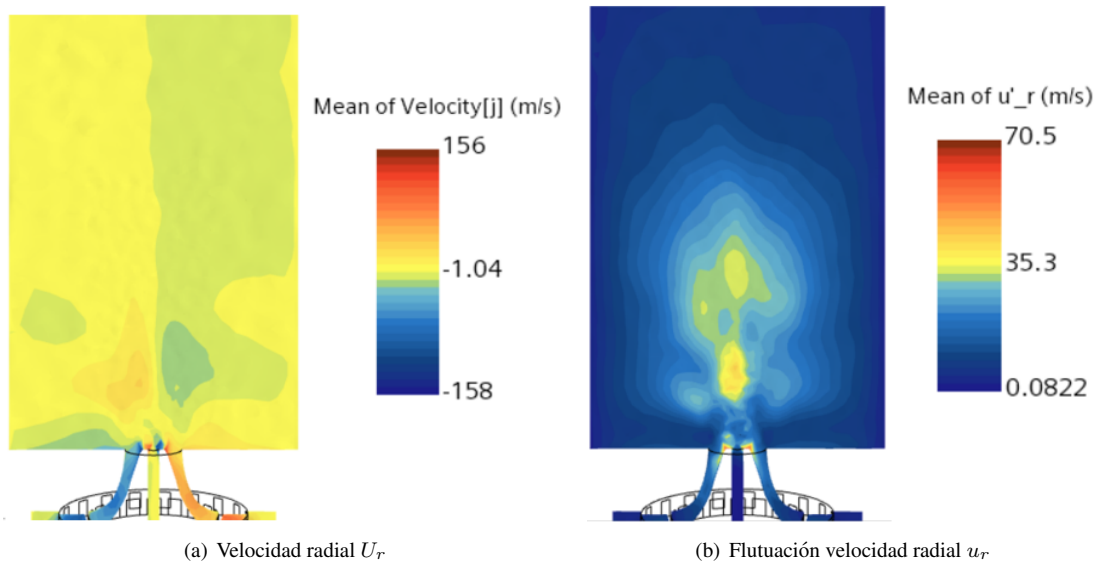
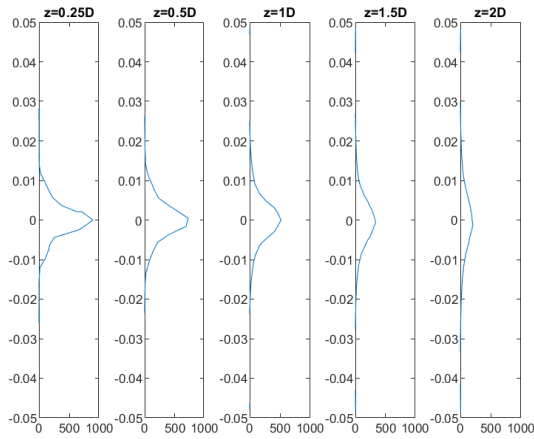
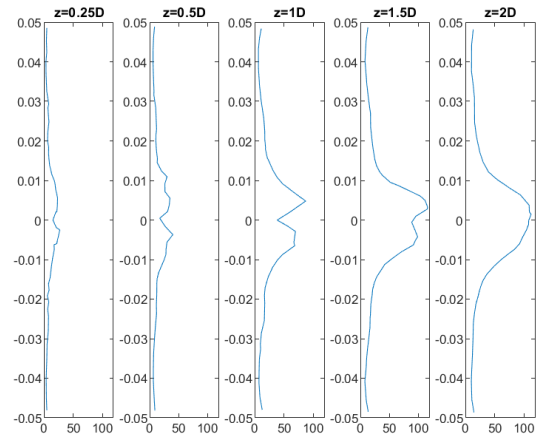


Figura 37: Promediado de velocidad radial U_r (a) y fluctuaciones de la velocidad radial u_r (b) del caso 2.

Por otro lado se puede ver con más detalle el perfil de velocidades a lo largo del eje de la cámara en las figuras 38, 39 y 40 con el fin de obtener más información sobre las estructuras turbulentas, lo cual se tratará en apartados posteriores.

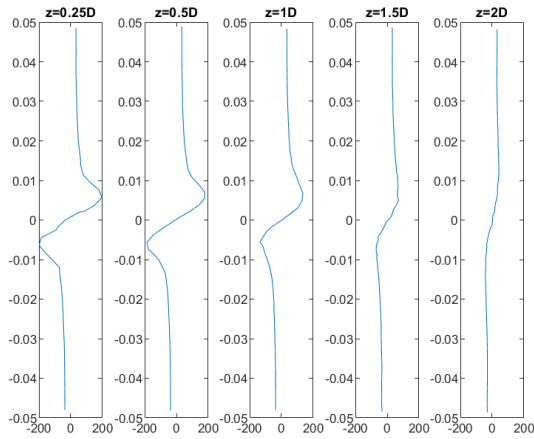


(a) Velocidad axial U_z

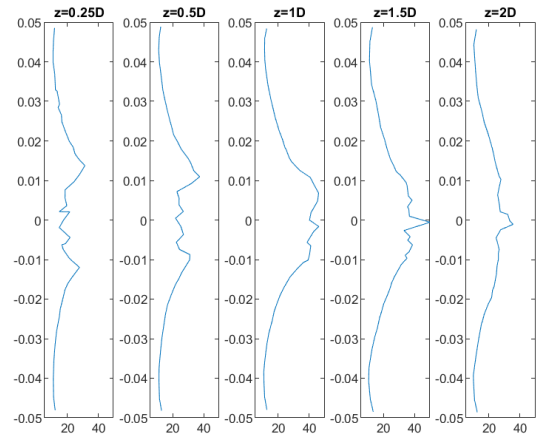


(b) Flutuación velocidad axial u_z

Figura 38: Promediado de la velocidad axial U_z (a) y promediado del RMS de la velocidad axial u_z (b) en el plano $[x=0]$.



(a) Velocidad tangencial U_θ



(b) Flutuación velocidad tangencial u_θ

Figura 39: Promediado de la velocidad tangencial U_θ (a) y promediado del RMS de la velocidad tangencial u_θ (b) en el plano $[x=0]$.

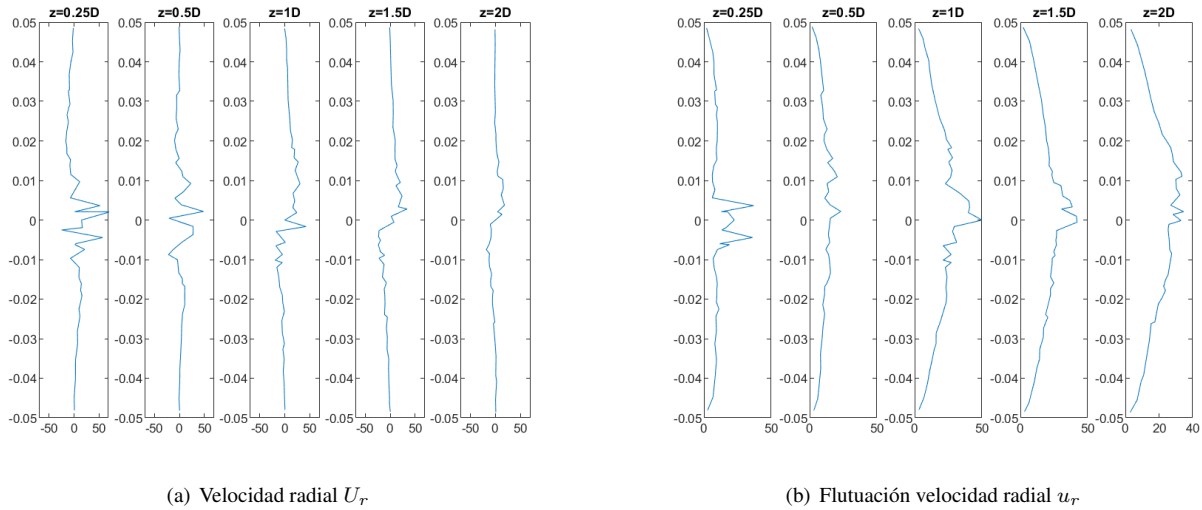


Figura 40: Promediado de la velocidad radial U_r (a) y promediado del RMS de la velocidad radial u_r (b) en el plano $[x=0]$.

Observando la velocidad axial, se pueden observar velocidades muy altas para el nitrógeno (condiciones claramente supersónicas) y se puede ver como a medida que nos alejamos de la zona de inyección la velocidad axial disminuye aunque no se ve que se alcancen velocidades negativas con lo cual se puede concluir que no existe la IRZ, figura 38 (a). Por otro lado, al igual que en el caso 1, las componentes de velocidad tangencial y radial presentan el patrón esperado y una velocidad más adecuada para la formación de estructuras turbulentas. En un mayor detalle se puede ver en la figura 39 (a) y 40 (a) como a medida que se avanza a lo largo del eje, la magnitud de la velocidad radial y tangencial se vuelve más pequeña y dejan de aparecer las oscilaciones que se pueden ver cerca de la zona de inyección, tal y como se ven en la figura 36 (a) y 37 (a). En cuanto a las fluctuaciones de las componentes, se ve un aumento de la intensidad de las fluctuaciones a lo largo del eje para las componentes axiales 38 (a) y 39 (a). Por otro lado en la figura 40 (b) se ven las fluctuaciones de la componente radial y se pueden observar grandes gradientes de velocidad cerca de la zona de inyección y a lo largo del eje se ve un perfil de velocidad más uniforme.

4.2.2. Estudio del proceso de mezcla

De la misma forma que en el caso 1 se puede ver la evolución del proceso de mezcla en la cámara de la caso 2 en la figura 41.

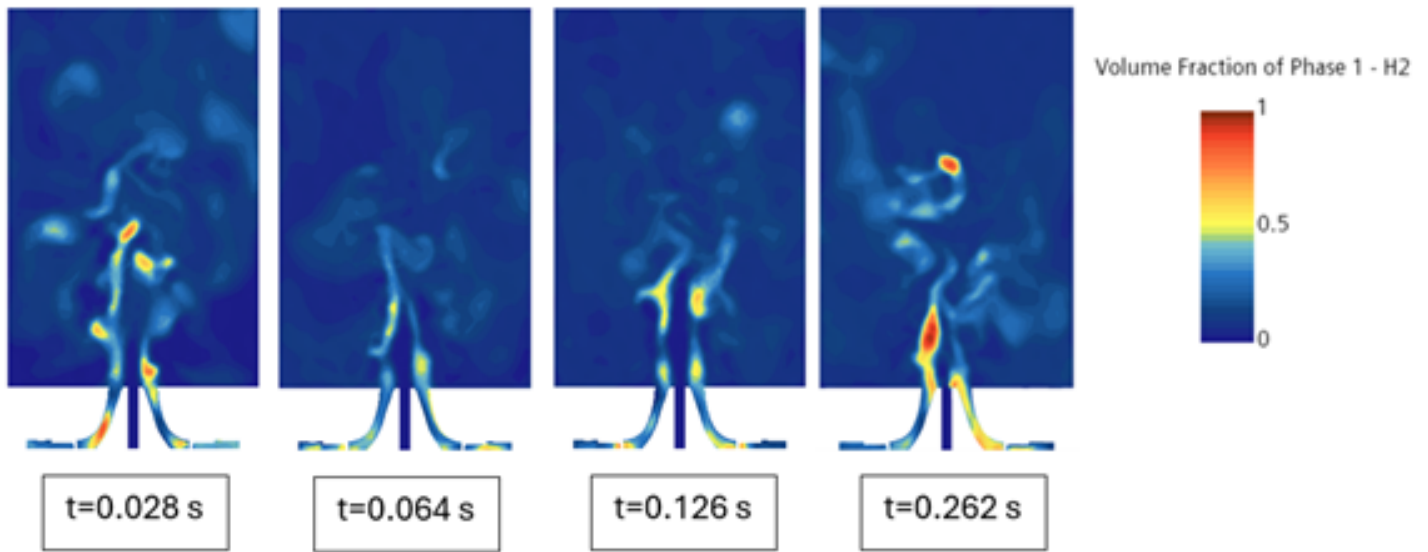


Figura 41: Evolución del proceso de mezcla (caso 2).

A diferencia del caso 1, la concentración de hidrógeno a lo largo de la cámara oscila en valores muy bajos, como se pudo ver también en la figura 20.

Para entender mejor el proceso de mezcla es importante atender a los límites de inflamabilidad que se define como el rango de concentraciones de hidrógeno en el que se puede producir los procesos de ignición y combustión. Dependen del combustible siendo el límite inferior para el hidrógeno de $[H_2] = 0,04$ y el límite superior de $[H_2] = 0,74$, con lo cual si un punto presenta una concentración volumétrica por debajo del límite inferior o por encima del límite superior no ocurrirá la ignición.

Con el fin de visualizar los límites de inflamabilidad del caso 2, se muestra en la figura 42 las iso-superficies de $[H_2]$ que corresponden con los límites de inflamabilidad. Esto muestra la zona susceptible de comenzar la ignición si se realiza un aporte de calor suficiente, con lo cual si se produjese la combustión real, esta zona muestra la zona donde la llama de difusión debería localizarse en un principio.

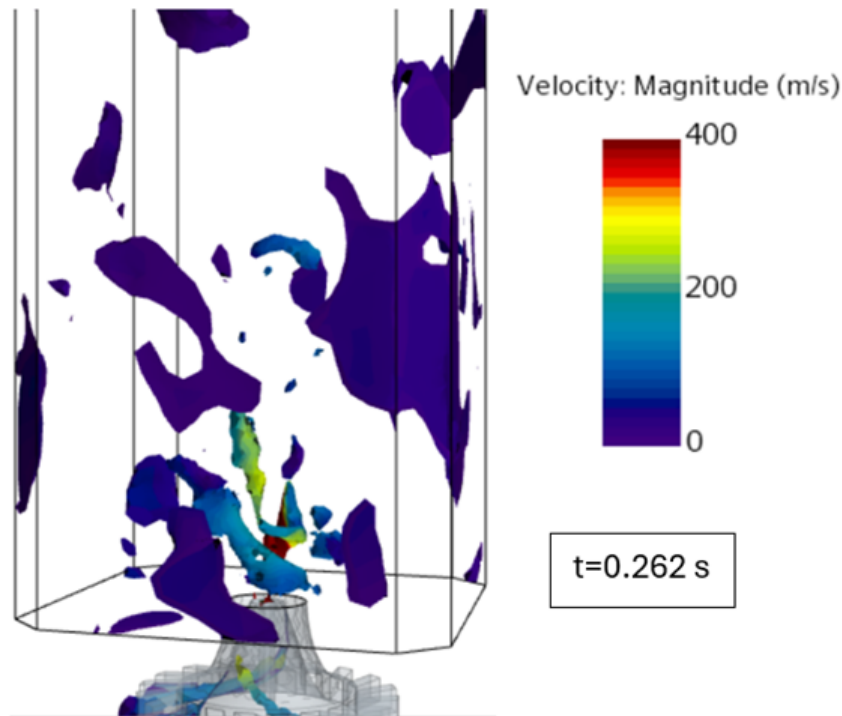


Figura 42: Contorno de velocidad de las iso-superficies de los límites de inflamabilidad de la mezcla.

Observando la figura, se pueden ver dos zonas claramente diferenciadas. En primer lugar, cerca de la zona de inyección se observan las mayores velocidades y los mayores gradientes, que es la zona donde se anclaría una supuesta llama tras el aporte necesario de energía. Por otro lado, se aprecia una zona cercana a las paredes del quemador, lo que podría afectar a la integridad estructural de la geometría, pudiendo alcanzar temperaturas relativamente altas en esas zonas.

4.2.3. Estudio de las estructuras del flujo

Tal y como se detalló en el apartado 2.4. existen tres estructuras turbulentas usuales en estos procesos de inyección y mezcla. El campo de velocidades mostrado aporta información sobre dichas estructuras, aunque se pueden ver utilizando las herramientas que ofrece el software empleado.

- **IRZ** Como se puede ver en la figura 22 (a) se produce una disminución de la presión generando una zona de recirculación, siendo esto un condición indispensable para que se forme la IRZ. Las velocidades a lo largo del eje tienen valores excesivamente grandes como se muestra en la figura 38 (a) y aunque disminuya a lo largo del eje las velocidades son aún demasiado altas, teniendo en cuenta eso, las velocidades tangenciales cercanas a esa zona de baja velocidad axial, figura 39 (a), no generan una caída de presión tan grande para generar la *Inner Recirculation Zone*, como se puede ver en la figura 22 (c).

- **CRZ** La *Corner Recirculation Zone* se puede observar en la zona cercanas a la pared, es decir, lejos de la zona de inyección y permite que la llama se ancle en una zona fija. En la figura 43 se muestra la CRZ del caso 2, donde como se puede ver aparecen cerca de las paredes zonas de recirculación, sin embargo las recirculaciones tienen un sentido perpendicular al esperado tal y como se podía ver en la figura 11.

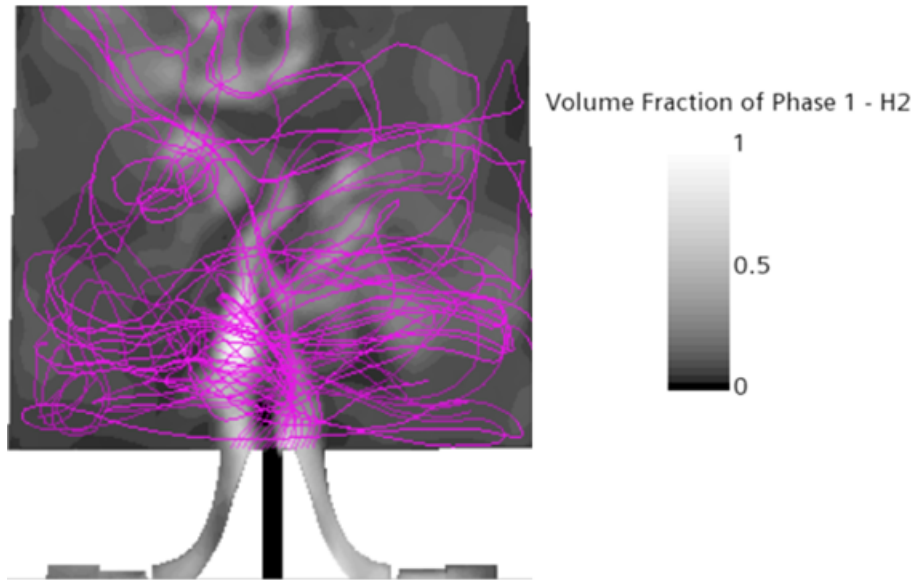


Figura 43: Visualización de la CRZ (*Corner Recirculation Zone*) del caso 2 a través de líneas de corriente sobre la concentración de H_2 .

- **PVC** Para visualizar el *Precessing Vortex Core* es necesario observar una zona de recirculación cercana a la inyección. Tal y como se ve en la figura 44, aparece una zona helicoidal debido al movimiento rotario de *swirl* del H_2 sobre el N_2 inyectado desde la zona central. En la figura 44 (izquierda) se ha representado las zonas con el mismo valor de criterio-Q, cuya formulación se define en la ecuación 16. El criterio-Q permite determinar aquellas zonas en las que la vorticidad (Ω) es superior a la tasa de deformación (S). Por otro lado, se muestra en la figura 44 (derecha) las iso-superficies que cumplen con el criterio- λ_2 , el cual es definido en la ecuación 17. La vorticidad (Ω) y la tasa de deformación se han definido en las ecuaciones 18 y 19 respectivamente y donde H corresponde con la matriz Hessiana de presión. El criterio- λ_2 permite identificar vórtices de acuerdo con el principio de mínima de presión, donde si al obtener los autovalores del tensor H, el segundo autovalor más grande es negativo, entonces dicha región contiene un vórtice. Finalmente, observando ambas figuras, se pueden ver como ambos criterios predicen la formación del PVC de forma muy similar en una región del dominio practicamente idéntica.

$$Q = \frac{1}{2}(\|\Omega\|^2 - \|S\|^2) \quad (16)$$

$$H = S^2 + Q^2 \quad (17)$$

$$\Omega = \frac{1}{2}(\nabla u - (\nabla u)^T) \quad (18)$$

$$S = \frac{1}{2}(\nabla u + (\nabla u)^T) \quad (19)$$

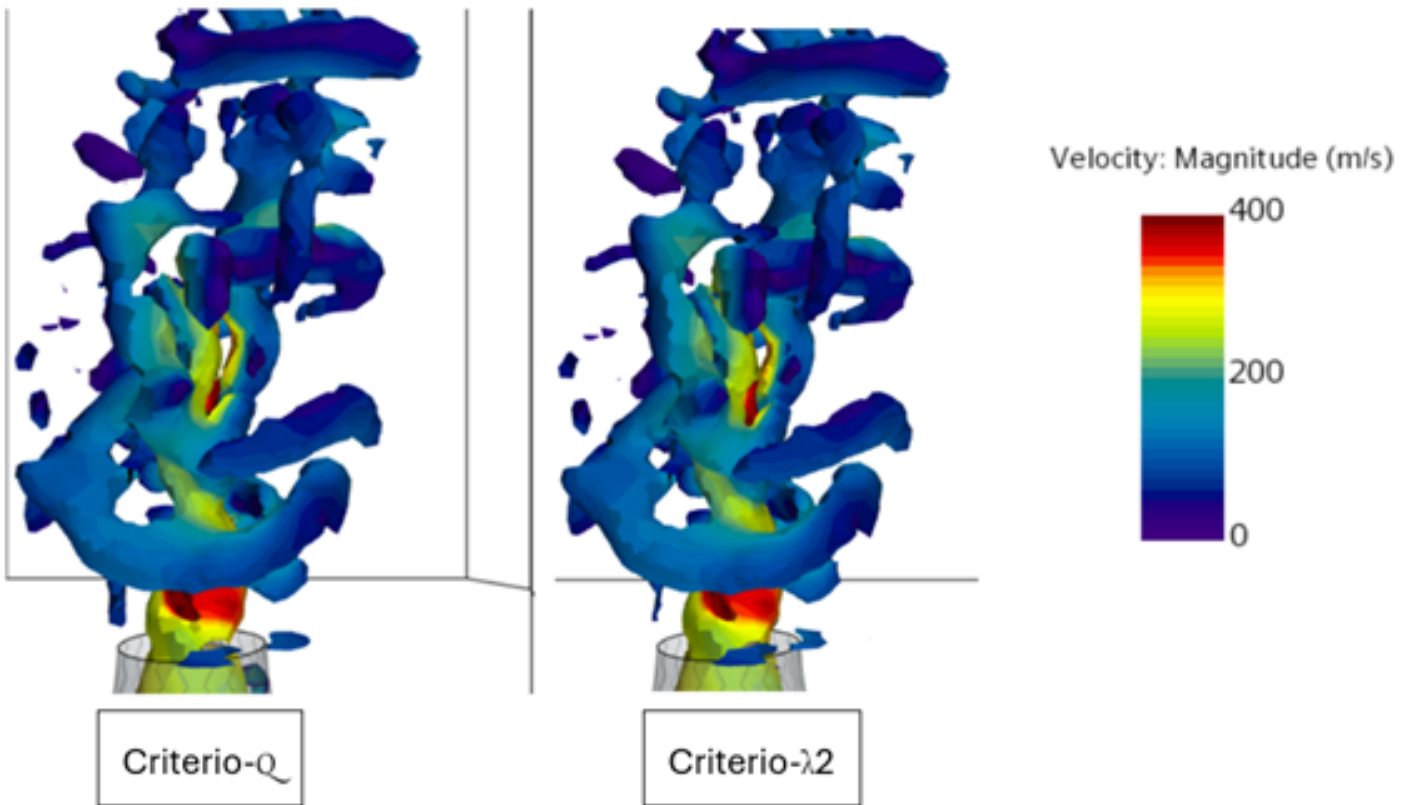


Figura 44: Visualización del PVC (*Precessing Vortex Core*) a través de iso-superficies de criterio-Q e iso-superficies de criterio- λ_2 .

5. Conclusiones y vías futuras

5.1. Conclusiones

Una vez desarrollados los resultados de las simulaciones, en este apartado se resumen las conclusiones más importantes. De forma muy general, los detalles de las simulaciones se consideran insuficientes para desarrollar un quemador en condiciones óptimas. De forma más particular, se exponen las conclusiones que se obtienen del trabajo:

- Debido al enorme coste computacional y tiempo de simulación necesario para obtener buenos resultados la malla computacional se ha adaptado para obtener unos resultados en un tiempo acorde al esperado para la realización del proyecto. Las celdas impuestas muestran unos índices de calidad insuficientes.
- Observando los índices de calidad de ambas simulaciones se observa que la estrategia de modelado de la SGS ha producido unos resultados aceptables aunque de acuerdo al primer punto la resolución espacial es insuficiente como se ha dicho antes.
- Los resultados del caso 1, indican que inyectar el hidrógeno por el "central inlet" con esos valores de gasto, permite ver que dicha configuración no puede ser ensayada debido a que la cámara se llena completamente de hidrógeno, lo que impide el estudio del proceso de mezcla.
- Los campos de velocidades que corresponden a la inyección central de hidrógeno permiten concluir que las velocidades dentro de la cámara son tan altas que impiden la formación de las estructuras turbulentas usuales en este tipo de procesos de inyección. Este caso de estudio muestra los resultados de un caso experimental, lo que permite predecir un mal proceso de mezcla y por lo tanto es un punto no operativo del mezclador actual.
- Los resultados del caso 2, inyectando el hidrógeno por el "plenum inlet", muestran la necesidad de disminuir la velocidad axial con el fin de favorecer la aparición de la IRZ, siendo necesario aumentar el número de Swirl (S).
- Los resultados obtenidos permiten predecir condiciones supersónicas de inyección usuales del H_2 .
- El análisis ANOVA sobre el segundo caso, ha confirmado la estacionariedad de la inyección lo cual permitirá corroborar los datos con el ensayo experimental realizado, brindando más información sobre el estado de operación usual del quemador.
- De acuerdo a los resultados obtenidos del estudio del caso 2, se puede concluir que es necesario disminuir la velocidad de inyección con el fin de favorecer la formación de las estructuras turbulentas citadas, con el fin de asegurar un correcto funcionamiento del quemador. De acuerdo al perfil de velocidad axial a lo largo del eje, es necesario obtener velocidades axiales negativas que confirmen la formación de la IRZ. De acuerdo a unas estimaciones realizadas, si se busca mantener el dosado y la geometría inicial, una buena opción sería ensayar con

$\dot{m}_{N_2} = 3,93 \cdot 10^{-4} [kg/s]$ y $\dot{m}_{H_2} = 2,36 \cdot 10^{-4} [kg/s]$. Con el fin de mantener siempre condiciones subsónicas en la inyección el gasto de hidrógeno debe ser menor a $\dot{m}_{H_2} = 13,17 \cdot 10^{-4} [kg/s]$ en condiciones actuales de temperatura y presión.

5.2. Vías de desarrollo futuras

Una vez expuestas las conclusiones del trabajo, se proponen una serie de conceptos con el fin de mejorar el desarrollo del proyecto y próximos trabajos con el fin de optimizar el proceso de inyección y mejorar los resultados. Estas nuevas propuestas son:

- De acuerdo a las conclusiones expuestas, es necesario un gran aumento del número de celdas, lo que aumentará el coste computacional de las simulaciones lo que conlleva a utilizar mayores herramientas de cálculo. De acuerdo al número de celdas que serían necesarias para obtener un cálculo lo suficientemente preciso, se requieren clústers con un gran número de procesadores para abordar estas simulaciones. Debido a una serie de circunstancias los recursos disponibles para la realización de las simulaciones de este proyecto han sido limitados, lo que ha afectado en la calidad del trabajo. De acuerdo con las estimaciones realizadas, el coste computacional sería aproximadamente de 50000 CPUh por 1 ms de simulación, ello para una región de 4 millones de celdas aproximadamente, aunque el coste puede oscilar si las condiciones de inyección a ensayar son distintas.
- Con el fin de corroborar las simulaciones realizadas, se debe ensayar experimentalmente el inyector con el fin de validar los resultados. Para corroborar esto es necesario realizar distintas pruebas con el fin de obtener el campo de velocidades del flujo para poder confrontar ambas pruebas e incluso con técnicas no intrusivas como PIV, etc.
- Los problemas que surgen del estudio del caso 1 concluyen que si se desea ensayar en esas condiciones de inyección, es necesario disminuir la velocidad de inyección. La solución más inmediata sugiere aumentar el diámetro de inyección de la región "central inlet", lo que conlleva a modificar toda la geometría de inyección.

6. Pliego de condiciones

El pliego de condiciones se trata de un documento contractual que busca exponer las exigencias técnicas y legales en las que se basa este Trabajo Final de Grado, donde queda detallado la correcta utilización de las instalaciones y equipos empleados.

Este apartado se divide en dos: un pliego de condiciones generales y un pliego de condiciones específicas. En primer lugar, el pliego de condiciones generales resume los deberes del personal relacionado con la realización del presente trabajo y además las condiciones durante el estudio del proceso simulación. En cambio, en el pliego de condiciones específicas se muestran condiciones particulares referentes al trabajo actual, donde se recogen todas las apreciaciones de las cuales el personal ha de ser informado, materiales y servicios informáticos para la realización del proyecto. En base a lo descrito, los siguientes puntos buscan abordar todos estos puntos.

6.1. Condiciones y normativa general

En este punto se detallan las condiciones y normas que regulan los deberes y derechos del personal implicado en la realización del Trabajo Final de Grado, donde también se detallará la calidad del puesto de trabajo tanto para el análisis como para la simulación.

6.1.1. Derechos y deberes de los trabajadores

En base a lo estipulado en las Disposiciones Generales de la Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo publicadas en el Boletín Oficial del Estado (BOEA-1971-380), el personal implicado en el trabajo están obligados a cooperar en la prevención de riesgos laborales en la empresa y asegurar la máxima higiene en la misma, también está obligado al cumplimiento de las instrucciones de dicha Ordenanza, así como el resto de reglas que la complementan y por último el compromiso del trabajador a seguir las instrucciones que sus superiores le hayan proporcionado.

Dicho esto, las obligaciones hacia el personal se pueden sintetizar en:

1. Ser informados de los temas en relación a Seguridad e Higiene y también sobre salvamento y socorrismo en los puestos de trabajo (dicha información debe ser proporcionada por la empresa o siguiendo el Plan Nacional).
2. Usar los medios de protección personal correspondientemente y garantizar que se encuentren en un estado de conservación adecuado.
3. Informar y avisar de posibles desperfectos, imperfecciones u otras situaciones que presenten un riesgo potencial en el puesto de trabajo a sus superiores.
4. Preservar una higiene particular correcta para eludir enfermedades e incomodidades a los trabajadores compañeros.
5. Pasar los reconocimientos médicos, vacunaciones y/o inmunizaciones establecidos por las Autoridades Sanitarias o el Servicio Médico de las Empresas.

6. No llevar al puesto de empleo bebidas u otras sustancias que no se encuentren autorizadas y también no presentarse al mismo en estado de embriaguez o en estado de intoxicación de cualquier tipo.
7. Ayudar en la extinción de siniestros y proporcionar socorro a las víctimas de accidentes laborales.
8. Pedir inmediatamente a sus superiores los medios de protección personal con el fin de realizar su trabajo en condiciones seguras. En caso de que no ser facilitados es deber también avisar al Comité de Seguridad e Higiene o a la Inspección Provincial del Trabajo.

6.1.2. Condiciones del puesto de trabajo

Teniendo en cuenta que la mayor parte del tiempo se ha empleado en simular los distintos procesos computacionales CFD y procesamiento de los datos obtenidos de los mismos, es importante tener en cuenta la normativa dispuesta según el Real Decreto 488/1997 de 14 de Abril, donde quedan recogidos mínimos en seguridad y salud sobre trabajadores en el uso de equipos que contienen pantallas de visualización de datos (PVD). En el Real Decreto nombrado se aplican las bases de la Ley 31/1995 de 8 de Noviembre sobre Prevención de Riesgos Laborales. A modo de descripción de los puntos más relevantes se detallan a continuación:

- **Ergonomía y calidad del puesto de trabajo**

Trabajar con pantallas de visualización de datos conduce a posturas estáticas durante un tiempo extenso, por lo que el diseño del puesto de trabajo es importante. Con el fin de mejorar la calidad de la zona de trabajo se establecen una serie de recomendaciones:

- Mesa y espacio de trabajo

El tamaño ha de ser suficiente para situar una pantalla, los dispositivos de iluminación y los documentos de consulta necesarios. El mobiliario y la mesa en general será mate, eludiendo reflejos que puedan causar molestias, sin esquinas puntiagudas y con superficies lisas y térmicamente no conductoras.

- Asiento

Debe disponer de un mecanismo regulable para ajustar la altura e inclinación adecuada para el trabajador. El respaldo debe adaptarse a la zona lumbar. Por otro lado, la superficie del mismo debe ser transpirable y preferiblemente que permitan el movimiento rotatorio.

- Pantalla

La distancia recomendada entre la pantalla y los ojos del usuario debe ser mayor a 40 cm e inferior a 75 cm y se situará en un ángulo de 120° del campo de visión de la persona. Por otro lado, permitirá ajustar la pantalla a las condiciones del puesto de trabajo.

- Postura

La posición de la espalda es muy importante, la cual debe mantenerse recta y en contacto con el respaldo del asiento. Por otro lado se recomienda que las piernas formen un ángulo recto y los brazos deben estar situados a la misma altura que el puesto de trabajo.

- Teclado

Debe ser independiente del equipo con el fin de poder situarlo en la zona más confortable posible. El teclado no debe estar situado en un ángulo superior a 25° con respecto a la horizontal y la altura de la tercera fila del mismo no debe superar los 30 mm medido desde la base. Por otro lado la superficie se recomienda que sea mate y sin esquinas afiladas.

• Medidas de emergencia y protección

La localización del espacio de trabajo ha de encontrarse próximo a una salida de emergencia, con el fin de permitir una rápida movilización del personal de trabajo ante una situación de peligro. Estas condiciones debieron ser garantizadas durante la edificación del centro de trabajo.

Además, se informará de todas las medidas de seguridad y protección, disponiendo también de las instalaciones antiincendios de acuerdo a la legislación vigente, aparte de todo esto las instalaciones de iluminación de emergencia de acuerdo con la distribución espacial y la plantilla de trabajadores, siendo el abastecimiento de estos recursos independiente al sistema general.

• Condiciones termohigrométricas

Las bases que cimentan las recomendaciones sobre condiciones termohigrométricas (temperatura, humedad y corriente) se establecen en el Real Decreto 486/1997.

De acuerdo al Real Decreto, se recomienda que la temperatura debe permanecer entre 20°C y 23°C durante el periodo de verano y para el periodo invernal el nuevo rango estaría entre 23°C y 26°C . Con este fin el espacio de trabajo debe disponer de los sistemas de refrigeración, calefacción y ventilación pertinentes.

Por otro lado, el nivel de humedad relativa debe ser independiente a la temperatura y permanecerá sobre el 45 % y 65 % para evitar problemas de sequedad.

• Instalaciones eléctricas

En primer lugar, la regulación de la instalación eléctrica en temas de su proyección, puesta en funcionamiento y mantenimiento debe ser realizada por una empresa que cuente con la autorización por parte del Ministerio de Industria y Energía o sino por la Consejería de la Comunidad Autónoma que tenga competencias en dicha materia. Todo lo dicho debe seguir el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión (REBT) con el fin de eludir cualquier problema.

Los puestos de trabajo con PVD para garantizar la seguridad eléctrica han de seguir los límites de emisiones electromagnéticas estipulados, que obligan a reducir a niveles mínimos con el fin de proteger la salud de los trabajadores. Todo ello conlleva a asegurar los cables y conexiones a través del mantenimiento correspondiente, diferenciando claramente los cables eléctricos de los cables telefónicos. Siguiendo esto, es obligatorio favorecer el acceso y mantenimiento de dichos cables evitando interrupciones al resto de trabajos que de ellos dependan.

• Iluminación

En el tema de la iluminación del espacio de trabajo, puede ser natural o artificial, aunque es preferible que sea natural. Por otro lado, si la iluminación es natural deberá ser acompañada con iluminación artificial en aquellos periodos del día en el que la intensidad lumínica no sea suficiente, garantizando un mínimo en iluminación en relación al entorno, exposición a PVD y a los requerimientos visuales del trabajador.

Aparte de estas consideraciones, se evitarán deslumbramientos y contrastes demasiado grandes que molesten al usuario, con lo que hay que situar las pantallas en dirección perpendicular a las ventanas. Una medida frente a ello es utilizar cortinas o persianas que anulen esos problemas.

- **Ruido**

La zona de trabajo se debe encontrar expuesta a unos niveles por debajo de lo que marca la normativa y se debe tener en cuenta el nivel de exposición de los trabajadores al ruido. Si esto no se puede lograr, se deben emplear los recursos necesarios en el emisor, el medio conductor y el receptor para reducir en la medida de lo posible sus efectos. Por otro lado, según lo estipulado en el Real Decreto 1316/1989 del 27 de Octubre se debe certificar que los trabajadores expuestos al ruido pasen reconocimientos médicos de forma regular.

El ruido en este tipo de trabajos no suele suponer un problema grave, pero se debe asegurar que el ruido continuo sea el más bajo posible utilizando equipos con la emisión y optimización sonora pertinentes.

6.2. Condiciones específicas

En este apartado, se detallarán las características tanto de los equipos particulares utilizados para el trabajo como los distintos softwares empleados para ejecutar la simulación y el post-proceso de la misma. Estas características son:

- **Equipo informático**

Debido a la necesidad de equipos de altas capacidades computacionales que pueden desarrollar este tipo de simulaciones LES, ha sido necesario recurrir a varios clústers de cálculo Rigel de la UPV acompañado de un PC particular para realizar todas las simulaciones en un tiempo razonable. Este PC presenta las siguientes especificaciones:

- **Sistema operativo:** Windows 10 Pro
- **Procesador:** Intel(R) Core(TM) i7-8750H CPU 2.20 GHz
- **Velocidad de reloj:** 4.1 GHz
- **Memoria RAM:** 16 GB
- **Disco Duro:** 475 GB

- **Softwares de cálculo y procesado**

Los softwares utilizados para la realización de todo el proyecto son por un lado Siemens StarCCM+ para la realización de las simulaciones y para la realización del post-tratamiento se ha utilizado MATLAB. Las licencias de Siemens StarCCM+ fueron entregadas por el Instituto Universitario Clean Mobility and ThermoFluids (CMT) organismo perteneciente a la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Por otro lado, la licencia de MATLAB es directamente ofrecida por la UPV.

7. Presupuestos

7.1. Enfoque del presupuesto

En este apartado se van a introducir y calcular los costes relacionados con este Trabajo Final de Grado. Dentro de todos los gastos se presentarán los gastos asociados al coste de los materiales, equipos empleados, softwares utilizados, instalaciones y el coste humano. El resumen será resumido en euros (€).

7.1.1. Procedimiento presupuestario

El proyecto al cual está asociado este trabajo está basado en una parte experimental y una parte computacional donde cada una de ellas tiene asociada unos presupuestos determinados:

- Recursos computacionales
Son los costes asociados al uso de los equipos informáticos que se han utilizados para la realización del Trabajo Final de Grado. Los recursos que se presentarán en los próximos puntos serán únicamente los asociados a los costes de amortización de los equipos informáticos debido a que los recursos empleados fueron prestados por el Instituto Universitario CMT y ya se encontraban en propiedad del mismo.
- Recursos humanos
Los costes de recursos humanos abarcan la ayuda de un becario, técnico de laboratorio y un profesor contratado doctor responsable de la coordinación del proyecto.

Los precios de los presupuestos han sido estipulados en base a las tarifas legales vigentes y por otro lado se han realizado aproximaciones congruentes para estimar ciertos gastos. Aparte, el presupuesto final incluirá un 6 % extra sobre el coste total para tener en cuenta el beneficio industrial y por último se tendrá en cuenta el Impuesto sobre el Valor Añadido (IVA).

En los siguientes puntos se desarrollan los presupuestos parciales, con las aclaraciones necesarias para el desarrollo de los mismos y para finalizar se realiza un cálculo estimativo del presupuesto total.

7.1.2. Desglose de costes

A continuación se presentan todos y cada uno de los recursos empleados para desarrollar el trabajo.

- Personal especializado

Descripción	Unidades	Conversión
Profesor Titular de Universidad	1	hr
Ingeniero superior	1	hr

- Recursos informáticos y hardware

Descripción	Unidades	Conversión
Ordenador portátil HP Pavilion	1	Ud
Disco duro externo	1	Ud

- Softwares

Descripción	Unidades	Conversión
Licencia StarCCM+	2	Ud
Licencia MATLAB R2020b	1	Ud
Licencia Microsoft Office	1	Ud
Licencia MobaXterm	1	Ud
Licencia Siemens NX	1	Ud
Licencia Overleaf	1	Ud

- Instalaciones

Descripción	Unidades	Conversión
Oficina	1	Ud
Permisos de oficina	1	Ud
Seguros de oficina	1	Ud

7.1.3. Costes unitarios

En primer lugar se define el coste de amortización como:

$$a = \frac{VC - VR}{n} \quad (20)$$

Donde a es la amortización en euros/año, VC y VR son el valor de compra y el valor residual del recurso respectivamente y n es el tiempo de amortización en años.

Por otro lado se define la tasa horaria como:

$$t_h = \frac{a}{h} \quad (21)$$

Donde t_h es la tasa horaria en euros/hora y h son las horas trabajadas por año.

Por otro lado, las horas trabajadas por el equipo de trabajo se estiman como:

$$h_a = (w_a - f_a) \cdot h_w \quad (22)$$

Donde h_a son las horas trabajadas por año, w_a y f_a son las semanas que tiene un año y las semanas festivas en un año respectivamente y h_w son las horas trabajadas por semana.

Una vez definido todo esto, se puede estimar el presupuesto de todos los recursos presentados en el apartado anterior.

- Personal especializado
 - Profesor Titular de Universidad: El salario bruto anual es de $a = 32520,52$ €/año, resultando en un coste por hora de $t_h = 18,74$ €/hora.
 - Ingeniero Superior: El salario bruto anual es de $a = 21000$ €/año, resultando en un coste por hora de $t_h = 11,41$ €/hora.
- Recursos informáticos y hardware
 - Ordenador portátil: Considerando un valor residual del 20 % y un periodo de amortización de 5 años. El coste de amortización es $a = 160$ €/año y un coste por hora de $t_h = 0,08$ €/hora.
 - Estación de cálculo: Considerando un valor residual del 20 % y un periodo de amortización de 8 años. El coste de amortización es $a = 300$ €/año y un coste por hora de $t_h = 0,15$ €/hora.
 - Disco Duro externo: El precio por unidad es de 50 €.
- Softwares
 - Licencia StarCCM+: El Instituto Universitario CMT ha adquirido licencias *Power on Demand* para realizar el trabajo, el precio del coste por hora es de $t_h = 21$ €/hora.
 - Licencia MATLAB: La licencia es adquirida por la UPV y es facilitada a los estudiantes por un valor de $a = 69$ €/año.
 - Licencia Microsoft Office: La licencia es adquirida por la UPV y es facilitada a los estudiantes por un valor de $a = 99$ €/año.
 - Licencia MobaXterm: La versión del software empleada es gratuita.
 - Licencia Overleaf: La versión empleada es gratuita.
- Instalaciones
 - Oficina: El coste asociado al lugar de trabajo es de 250 €/mes. Considerando que el periodo de trabajo es de 5 meses, el coste total es 1250 €.

7.1.4. Cálculo del presupuesto total

En este apartado se realizará un cálculo del presupuesto total asociado a todos los costes presentados anteriormente. A continuación se muestra una tabla resumen y el resultado final.

Descripción	Cantidad	Coste unitario	Coste total
Personal			
Prof. Titular	75	18.74 €/hora	937 €
Ingeniero Superior	300	11.41 €/hora	3423 €
			Total: 4360 €
Equipos			
Ordenador portátil	300	0.08 €/hora	16€
			Total: 16€
Recursos			
Disco duro externo	1	50€	50€
			Total: 50€
Licencias			
Lic. StarCCM+	720	21 €	15120 €
Lic. MATLAB	1	69 €	69 €
Lic. Microsoft Office	1	99 €	99€
			Total: 15288€
Instalaciones			
Oficina	1	1250 €	1250 €
			Total: 1250 €
			Recursos totales: 20914€
			Beneficio industrial (6 %): 1254,84€
			Total ejecución por contrata: 22168,64€
			+ 21 % I.V.A.: 4391,94€
			Presupuesto total C/I.V.A.: 26560,58€

Referencias

- [1] M.David Barre. “SIMULATION NUMERIQUE DE L’ALLUMAGE DANS LES CHAMBRES DE COMBUSTION AERONAUTIQUES”. Tesis doct. Université de Toulouse, 2014.
- [2] JC Broda et al. “An experimental study of combustion dynamics of a premixed swirl injector”. En: *Symposium (International) on Combustion*. Vol. 27. 2. Elsevier. 1998, págs. 1849-1856.
- [3] I Celik, M Klein y J Janicka. “Assessment measures for engineering LES applications”. En: (2009).
- [4] IB Celik, ZN Cehreli e I Yavuz. “Index of resolution quality for large eddy simulations”. En: (2005).
- [5] JMJ Den Toonder y FTM Nieuwstadt. “Reynolds number effects in a turbulent pipe flow for low to moderate Re”. En: *Physics of Fluids* 9.11 (1997), págs. 3398-3409.
- [6] Laurent YM Gicquel, Gabriel Staffelbach y Thierry Poinso. “Large eddy simulations of gaseous flames in gas turbine combustion chambers”. En: *Progress in energy and combustion science* 38.6 (2012), págs. 782-817.
- [7] Peter Jansohn. “Modern gas turbine systems: High efficiency, low emission, fuel flexible power generation”. En: (2013).
- [8] Sanghoon Kook et al. “The effect of swirl ratio and fuel injection parameters on CO emission and fuel conversion efficiency for high-dilution, low-temperature combustion in an automotive diesel engine”. En: *SAE Transactions* (2006), págs. 111-132.
- [9] Sanghoon Kook et al. “The influence of charge dilution and injection timing on low-temperature diesel combustion and emissions”. En: *SAE transactions* (2005), págs. 1575-1595.
- [10] Arthur H Lefebvre. “Gas Turbine”. En: *Combustion* (1999).
- [11] Juan Antonio Linares Gallego. “Recerca sobre el nou motor de pila de combustible impulsat per Hidrogen del nou projecte ZEROe de la companyia Airbus”. En: (2022).
- [12] Cecil Marek, Timothy Smith y Krishna Kundu. “Low emission hydrogen combustors for gas turbines using lean direct injection”. En: *41st AIAA/ASME/SAE/ASEE joint propulsion conference & exhibit*. 2005, pág. 3776.
- [13] Parag Rajpara et al. “Influence of fuel injection method on performance of upward swirl can-type combustor”. En: *Applied thermal engineering* 130 (2018), págs. 319-330.
- [14] Hannah Ritchie. “Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from?” En: *Our World in Data* (2020). <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>.
- [15] Antonio Javier Serrano García. “Estudio CFD de la inyección y mezcla de hidrógeno en quemadores de flujo continuo”. Tesis doct. Universitat Politècnica de València, 2023.
- [16] Luis Vázquez Seisdedos et al. “Método para detección de estados estacionarios: aplicación a unidades de generación eléctrica”. En: *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones* 35.2 (2014), págs. 45-61.
- [17] Shanwu Wang et al. “Large-eddy simulations of gas-turbine swirl injector flow dynamics”. En: *Journal of Fluid Mechanics* 583 (2007), págs. 99-122.