

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

FACULTAD DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos



**PROYECTO FIN DE CARRERA**

ESTUDIO DE LAS INESTABILIDADES DE COMBUSTIÓN EN UN  
QUEMADOR ESTABILIZADO POR GIRO MEDIANTE  
VELOCIMETRÍA POR IMAGEN DE PARTÍCULAS (PIV)

**ANGEL PABLO GARCÍA GUTIÉRREZ**

**Bajo la dirección de MATHIEU LEGRAND**

**LEGANÉS, JULIO 2010**

# AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer infinitamente el apoyo y comprensión que mi familia ha mostrado a lo largo de estos 4 años, que finalmente pasaron demasiado rápido, pero que espero que no signifiquen el fin de mi trayectoria académica.

Agradecer enormemente la labor de Mathieu como tutor, ya no solo por lo indispensable que ha supuesto su ayuda, paciencia y recomendaciones para la consecución del proyecto, sino por lo mucho que he aprendido sobre infinidad de aspectos gracias a él.

Y gracias por supuesto a todos mis amigos, tanto a los que iniciamos el viaje juntos hace ya 12 años, como a los que conocí al iniciar esta nueva etapa (Víctor, César, Chelly, Lolo, Virginia) sin los cuales esta aventura no hubiera sido tan alucinante.

# RESUMEN

El presente proyecto trata sobre el estudio del comportamiento de un flujo a la salida de un quemador estabilizado por giro, centrándose especialmente en las propiedades de transición que conseguirían sostener condiciones de combustión, estabilizando la llama a la salida de la tobera.

Para dicho análisis se han llevado a cabo dos tipos de estudios. Por un lado, el del campo acústico cercano, ya que para determinadas condiciones se producen picos acústicos que indican la existencia de cierta inestabilidad periódica. Por otro lado, se lleva a cabo un estudio del comportamiento del flujo a la salida del quemador mediante velocimetría por imágenes de partículas (PIV) estereoscópica. Esta técnica de medida láser no intrusiva proporciona los campos instantáneos de las tres componentes de la velocidad en un plano. Con ello, se han identificado los diferentes tipos de flujos que se desarrollan, analizando el ángulo de apertura, los perfiles de velocidad y las zonas de recirculación.

Los resultados obtenidos mediante velocimetría por imágenes de partículas han permitido explicar el fenómeno fluido-dinámico que da origen al comportamiento acústico tan marcado del quemador en determinadas condiciones de número de Reynolds y de Swirl. Se han observado y estudiado unas calles de torbellinos que se generan cuando el flujo está sometido a mucho giro, revelando la existencia de una importante inestabilidad en este tipo de flujos.

Con objeto de una mejor comprensión de las técnicas y equipos utilizados, se definen las características y el funcionamiento de los quemadores estabilizados por giro, los fundamentos del PIV, los sistemas de adquisición de imágenes, una serie de generalidades de los láseres así como la descripción de todas las instalaciones utilizadas en el laboratorio.

# ABSTRACT

The present project is to study the behaviour of a flow at the exit of a swirl stabilized burner, focusing especially on the transition conditions that would achieve to support combustion conditions, stabilizing the flame in the nozzle exit.

For this analysis have been conducted two types of studies. On the one hand, the acoustic near field, because in certain conditions the presence of acoustic peaks indicate the existence of periodic instability in the flow. On the other hand, a study of flow performance at the exit of the burner using stereo particle imaging velocimetry (PIV). This measurement technique provides non-intrusive laser fields of the three instantaneous velocity components in a plane. With this data, we identified different types of flows that are developed by analyzing the opening angle, velocity profiles and recirculation zones.

The results obtained by PIV allow us to explain the fluid-dynamic phenomenon that origins to the special acoustic performance of the burner under certain conditions of Reynolds and Swirl numbers. It has been observed and studied the formation of vortex streets that are generated when the flow is subject to much swirl, revealing the existence of considerable instability in these types of flows.

To understand the techniques and equipment used, we define the characteristics and performance of swirl stabilized burners, fundamentals of PIV, the imaging systems, generalizations of lasers and a description of all facilities used in the laboratory.



# ÍNDICE GENERAL

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>11</b>
<b>2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA.....</b>	<b>14</b>
2.1 OBJETIVOS.....	15
2.2 METODOLOGÍA.....	16
<b>3. QUEMADORES ESTABILIZADOS POR GIRO .....</b>	<b>17</b>
3.1 INTRODUCCIÓN.....	18
3.2 PROCESO DE COMBUSTIÓN DE PREMEZCLA .....	19
3.3 LLAMAS ESTABILIZADAS POR GIRO .....	20
3.4 GENERACIÓN DEL GIRO O SWIRL .....	24
3.5 NÚMERO DE SWIRL .....	25
3.6 TIPOS DE QUEMADORES.....	27
3.7 DESCRIPCIÓN DEL QUEMADOR .....	28
<b>4. VELOCIMETRÍA POR IMÁGENES DE PARTICULAS (PIV) .....</b>	<b>30</b>
4.1 INTRODUCCIÓN.....	31
4.2 VELOCIMETRÍA LÁSER .....	32
4.3 MÉTODOS DE VELOCIMETRÍA LÁSER.....	33
4.3.1 Medida del tiempo de vuelo .....	33
4.3.2 Medida del desplazamiento Doppler .....	34
4.3.3 Medida del espacio recorrido por el trazador .....	34
4.3.4 Comparación de las técnicas de medida.....	35
4.4 ADQUISICIÓN DE IMÁGENES.....	36
4.4.1 Tecnología CCD .....	36
4.4.2 Deformación de la imagen.....	38
4.4.3 Filtro pasa bajo .....	38
4.4.4 Disposición de las cámaras.....	38
4.5 FUNDAMENTOS DEL PIV.....	39
4.5.1 TÉCNICAS DE CORRELACIÓN.....	41



4.5.2	AUTO-CORRELACIÓN .....	41
4.5.3	CORRELACIÓN CRUZADA .....	42
4.5.4	Correlación de segundo orden .....	44
4.5.5	Algoritmos “Multi-grid” .....	45
4.6	PIV ESTEREOSCÓPICO .....	45
4.7	GENERALIDADES DEL LÁSER .....	47
4.7.1	Funcionamiento básico .....	48
4.7.2	Láser pulsado de Neodimio-YAg .....	49
4.7.3	Seguridad en la utilización de láseres .....	51
4.7.4	Metodología en la utilización del láser .....	53
4.8	ELECCIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE SEMBRADO .....	54
<b>5.</b>	<b>INSTALACIONES DE LABORATORIO .....</b>	<b>58</b>
5.1	DESCRIPCIÓN DEL QUEMADOR .....	59
5.2	DESCRIPCIÓN DEL LÁSER Y LA ÓPTICA .....	62
5.3	CALIBRACIÓN DEL SISTEMA DE MEDIDA .....	64
5.3.1	Modelo de pin-hole .....	64
5.4	DISPOSICIÓN DE LAS CÁMARAS .....	68
5.5	SEMBRADO .....	69
5.5.1	Sembrador Laskin .....	69
5.5.2	Sembrador Ciclón .....	71
5.6	ESQUEMA DE LA INSTALACIÓN .....	72
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTALES .....</b>	<b>74</b>
6.1	ESTUDIO DEL CAMPO ACÚSTICO .....	75
6.2	ESTUDIO MEDIANTE PIV .....	84
6.2.1	Introducción .....	84
6.2.2	Tipos de flujo .....	84
6.2.3	Perfiles de velocidades .....	89
6.2.4	Campos de velocidades .....	92
6.2.5	Ángulo de apertura .....	93
6.2.6	Energía cinética turbulenta .....	94
6.3	ANÁLISIS DE LA FRECUENCIA DE TORBELLINOS .....	95



---

<b>7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....</b>	<b>97</b>
7.1 CONCLUSIONES.....	98
7.2 TRABAJOS FUTUROS.....	99
<b>8. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>102</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

## QUEMADORES ESTABILIZADOS POR GIRO

FIGURA 3.1: Demanda energética en la península en el año 2009 .....	18
FIGURA 3.2: Turbina de gas aeronáutica.....	20
FIGURA 3.3: Distribución adecuada de corrientes.....	21
FIGURA 3.4: Cámara con inyector a contracorriente.....	21
FIGURA 3.5: Cámara con tubos a baja presión a contracorriente .....	22
FIGURA 3.6: Propagación del flujo en el bluff body .....	22
FIGURA 3.7: Cámara con swirl.....	23
FIGURA 3.8: Aplicación de swirl en motor alternativo .....	24
FIGURA 3.9: Zona de recirculación .....	27
FIGURA 3.10: Diseño del quemador .....	28

## VELOCIMETRÍA POR IMÁGENES DE PARTICULAS (PIV)

FIGURA 4.1: Diferentes técnicas de velocimetría ópticas .....	35
FIGURA 4.2: Instalación general para medición con PIV .....	39
FIGURA 4.3: Ejemplo de auto-correlación en una imagen doblemente expuesta.....	41
FIGURA 4.4: Correlación cruzada para una ventana de interrogación.....	42
FIGURA 4.5: Correlación de segundo orden .....	44
FIGURA 4.5: Ejemplo de configuración de estéreo PIV .....	45
FIGURA 4.6: Reconstrucción 3D con desplazamientos perpendiculares al plano luz ...	46
FIGURA 4.7: Esquema De un láser .....	47
FIGURA 4.8: Interacciones elementales entre átomo y radiación electromagnética.....	48
FIGURA 4.9: Diagrama de energías en un láser Nd-YAG .....	50
FIGURA 4.10: Diagrama de fuerzas sobre una partícula trazadora.....	55

## INSTALACIONES DE LABORATORIO

FIGURA 5.1: Diseño 3D del quemador empleado .....	60
FIGURA 5.2: Detalle de la entrada del flujo tangencial al conducto central.....	61
FIGURA 5.3: Esquema de la tobera.....	61
FIGURA 5.4: Representación trampa de luz.....	63
FIGURA 5.5: Láser Nd: Yag.....	63

FIGURA 5.6: Regleta de calibración .....	65
FIGURA 5.7: Elección de puntos.....	65
FIGURA 5.8: Identificación de puntos .....	66
FIGURA 5.9: Efecto de el sistema Scheimpflug.....	66
FIGURA 5.10: Dispositivo Scheimpflug .....	66
FIGURA 5.11: Ejemplo de imagen obtenida por cada cámara .....	67
FIGURA 5.12: Solape de imágenes .....	67
FIGURA 5.13: Disposición de las cámaras.....	68
FIGURA 5.14: Diagrama de un sembrador Laskin.....	70
FIGURA 5.15: Inyector con impactor.....	70
FIGURA 5.16: Fotografía del difusor utilizado .....	71
FIGURA 5.17: Esquema de un separador ciclón .....	72
FIGURA 5.18: Fotografía de la instalación .....	72
FIGURA 5.19: Esquema de la instalación .....	73

### RESULTADOS EXPERIMENTALES

FIGURA 6.1: Espectros acústicos para $S = 0,83$ .....	76
FIGURA 6.2: Espectros acústicos para $Re=6010$ .....	77
FIGURA 6.3: $Re(S)$ para todos los $R$ .....	80
FIGURA 6.4: $Re(S_r)$ para todos los $R$ .....	80
FIGURA 6.5: $Re(S_r)$ para todos los $R$ .....	81
FIGURA 6.6: Curva de transición acústica para $R =$ .....	82
FIGURA 6.7: Curva de transiciones acústicas .....	83
FIGURA 6.8: TIPO 0 .....	86
FIGURA 6.9: TIPO I.....	86
FIGURA 6.10: TIPO II.....	87
FIGURA 6.11: Detalle salida tobera .....	88
FIGURA 6.12: Errores en velocidades debido a la inclinación láser.....	88
FIGURA 6.13: Perfiles de velocidades para tipo 0 .....	89
FIGURA 6.14: Perfiles de velocidades para tipo I.....	90
FIGURA 6.15: Perfiles de velocidades para tipo II .....	90
FIGURA 6.16: Campos de velocidades .....	92
FIGURA 6.17: Ángulos de apertura.....	93
FIGURA 6.18: Energía cinética turbulenta .....	94



FIGURA 6.19: Ejemplo de arrollamiento de vórtices.....**95**  
FIGURA 6.20: Representación de  $d$  y  $V_y$ .....**96**



## *CAPÍTULO 1*

# INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la creciente concienciación social acerca de la acción del hombre en su entorno natural ha inducido nuevas políticas medioambientales, tanto en el ámbito nacional, como a nivel mundial. Estas políticas tienden a restringir cada vez más las emisiones de contaminantes y hacen necesarias evoluciones tecnológicas en la mayoría de procesos, suponiendo numerosos retos ingenieriles en el sector energético, del transporte o industrial. Este aspecto se hace notar especialmente en aquellos procesos que involucran elevados consumos (de energía o de materias primas) y que generan numerosos agentes contaminantes.

Además, los procesos energéticos basados en la combustión de hidrocarburos fósiles siguen teniendo un papel fundamental en el panorama energético mundial, con una presencia de hasta el 40% del total en cuanto a la generación energética española en el año 2009 <sup>[8]</sup>. El objeto de estudio se centra particularmente en las turbinas de gas, que desempeñan un papel fundamental en diversos campos energéticos de la actualidad. Por un lado, el 25% de la generación de energía eléctrica española proviene de ciclos combinados, que basan su funcionamiento en la utilización de turbinas de vapor y turbinas de gas. Por otro lado, la presencia de turbinas de gas es muy marcada en la industria aeronáutica, especialmente en la aviación civil.

En la actualidad, los rendimientos de estos procesos (ciclos combinados y turbinas de gas para transporte aéreo) están muy optimizados, pero presentan limitaciones en cuanto a la estabilización de la llama y a la generación de contaminantes. Por ello, cobra especial importancia el estudio de aquellas condiciones de operación que permitan una combustión estable y la reducción de la temperatura de la llama permitiendo una reducción significativa de las emisiones de óxidos de nitrógeno.

Uno de los métodos más efectivos para conseguir estos objetivos es la estabilización de una llama de premezcla pobre mediante giro o “swirl”. A pesar de ser una tecnología relativamente bien desarrollada, este tipo de llamas están sometidas a inestabilidades acústico-térmicas que pueden llegar a la deterioración o destrucción de la cámara de combustión.

Se analizan en este proyecto distintos métodos para la obtención del giro y se definen los parámetros que permiten caracterizarlo. Se estudia el campo acústico con el



fin de establecer las condiciones de funcionamiento del quemador en las cuales podrían aparecer algún tipo de inestabilidad. Finalmente, el estudio detallado del flujo a la salida de un quemador de gas propano mediante la técnica de velocimetría por imágenes de partículas permite establecer distintos regímenes de funcionamiento. En adición, permite relacionar las inestabilidades acústicas con el comportamiento fluido-dinámico del flujo estudiado.



## *CAPÍTULO 2*

# OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

## 2.1 OBJETIVOS

El principal objetivo de este proyecto es el estudio de las inestabilidades del quemador estabilizado por giro utilizado con el fin de caracterizar su mapa de estabilidad, es decir, caracterizar los distintos regímenes de funcionamiento en los que puede considerarse el flujo como estable en función de los diferentes parámetros adimensionales que rigen el comportamiento de este tipo de flujos.

En determinadas condiciones, se observan claramente variaciones en el comportamiento del campo acústico. Estudios anteriores han revelado la importancia del giro (caracterizado por el número de swirl) y del número de Reynolds en el comportamiento del flujo. Pero uno de los objetivos de este proyecto es establecer si la transición hacia la inestabilidad del flujo depende también de otros factores, particularmente del efecto de la repartición del giro (distribución radial de momento angular). Por ello, se analizará el campo acústico cambiando la repartición de giro, con objeto de establecer las condiciones bajo cuales se inestabiliza el flujo.

Se tratará también de caracterizar el tipo de flujo resultante para diversas configuraciones adoptadas, visualizando gráficamente el aspecto del flujo gracias a técnicas de PIV además de determinar el campo de velocidades del mismo. Al tratarse de un flujo altamente tridimensional, cobra especial importancia la determinación de las 3 componentes de la velocidad. Para ello, se ha optado por utilizar la variante estereoscópica de la técnica de PIV. Entender y utilizar esta compleja técnica de medida es un objetivo secundario de este proyecto, pero es necesaria para su buen desarrollo.

Finalmente, el último objetivo del presente proyecto consiste en establecer una relación coherente entre los campos instantáneos de velocidades obtenidos mediante PIV estereoscópico y la presencia de picos marcados en los espectros acústicos.

## 2.2 *METODOLOGÍA*

Una vez determinados los objetivos, pasaremos a describir la metodología empleada para el cumplimiento de los mismos.

En primer lugar fue necesario un estudio de los fundamentos de las técnicas de medida a emplear, centrándonos en el funcionamiento de la técnica de PIV estereoscópico. Además se realizó una revisión bibliográfica sobre quemadores estabilizado por giro para así comprender su funcionamiento y los mecanismos de estabilización de la llama.

Es imprescindible la familiarización con el entorno del laboratorio, en el que será necesario manipular múltiples elementos tales como equipos informático especiales, cámaras, equipo láser, caudalímetros, etc.

El siguiente paso fue definir las condiciones de operación en las que realizaríamos los estudios. Como se verá más adelante, el giro generado en la cámara se consigue variar gracias a dos métodos diferentes, lo que nos da un conjunto de datos experimentales mucho más amplio.

Primero se estudió el campo acústico cercano mediante el uso de un micrófono de alta respuesta en frecuencia, permitiendo así establecer las condiciones para las que existía un pico acústico característico de flujos inestables.

A continuación se pasó al estudio mediante PIV. Para ello, es necesario realizar primero un exhaustivo proceso de calibración tanto del láser como de las cámaras, con el fin de que las medidas realizadas sean lo más fiables posibles. Seguidamente, pasan a tomarse las medidas para múltiples configuraciones, las cuales han de ser procesadas por los equipos informáticos para su posterior estudio.

## CAPÍTULO 3

# QUEMADORES ESTABILIZADOS POR GIRO

### Índice general

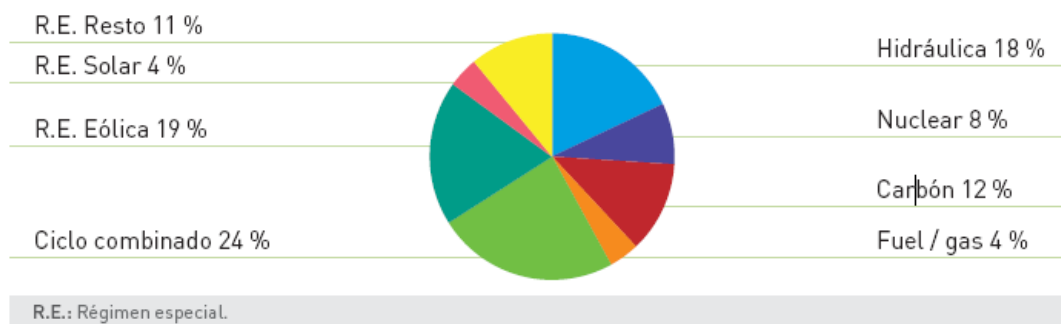
---

3.1	INTRODUCCIÓN.....	18
3.2	PROCESO DE COMBUSTIÓN DE PREMEZCLA .....	19
3.3	LLAMAS ESTABILIZADAS POR GIRO .....	20
3.4	GENERACIÓN DEL GIRO O SWIRL .....	24
3.5	NÚMERO DE SWIRL .....	25
3.6	TIPOS DE QUEMADORES .....	27
3.7	DESCRIPCIÓN DEL QUEMADOR .....	28

---

### 3.1 INTRODUCCIÓN

La combustión, pese al actual auge de las fuentes de energías renovables, sigue siendo un proceso aún indispensable para el mundo actual, tanto para la generación de calor, potencia mecánica o energía eléctrica. En el año 2009, la repartición de la demanda eléctrica en la península ibérica tiene el siguiente aspecto:



**FIGURA 3.1: Demanda energética en la península en el año 2009 <sup>[8]</sup>**

Como puede observarse en la Figura 3.1, el 40 % de la producción energética aún está basada en procesos de combustión (ciclo combinado, fuel/gas y carbón).

De estos datos se desprende la importancia del desarrollo e innovación en cámaras de combustión que permitan una mayor eficiencia de las mismas unido a un menor consumo de combustible y a una reducción de las emisiones contaminantes.

En este caso, nos centraremos en el estudio de las cámaras de combustión destinadas a turbinas de gas, que representan una parte esencial en el ciclo combinado que tanta importancia tiene dentro del panorama eléctrico español (correspondiente a casi un cuarto del total), y en el sector del transporte aéreo a nivel mundial.

### 3.2 PROCESO DE COMBUSTIÓN DE PREMEZCLA

La combustión es un proceso de oxidación rápida de una sustancia (combustible) en presencia de un oxidante (comburente), acompañado de una intensa liberación de calor y frecuentemente de luz. El combustible es cualquier sustancia capaz de arder en determinadas circunstancias mientras que el comburente es el elemento en cuya presencia el combustible puede arder. El comburente natural más abundante es el oxígeno, por lo cual en la práctica se utiliza el aire ambiente como comburente ya que está compuesto prácticamente por 21% de Oxígeno ( $O_2$ ) y 79% de Nitrógeno ( $N_2$ ) en volumen. Únicamente en casos especiales se utilizan atmósferas enriquecidas en oxígeno e incluso oxígeno puro (en metalurgia principalmente).

En el caso de los combustibles hidrocarburos comunes (de fórmula química genérica  $C_xH_y$ ), el proceso de combustión consiste en una recombinación química del combustible con el oxígeno de la atmósfera que lleva a la formación de dióxido de carbono y de agua, así como otra serie de productos, aun que en mucho menor medida, como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno  $NO_x$ , o dióxido de azufre  $SO_2$  que procede de los componentes menores del combustible.

A la riqueza de la mezcla combustible-aire se le denomina dosado y sus valores comprenden desde cero para únicamente aire, hasta infinito para sólo combustible. Generalmente se normaliza este dosado con el estequiométrico, denominándole dosado relativo ( $\phi$ ).

$$\phi = \frac{\left( \frac{m_{\text{combustible}}}{m_{\text{aire}}} \right)_{\text{real}}}{\left( \frac{m_{\text{combustible}}}{m_{\text{aire}}} \right)_{\text{estequiométrico}}}$$

ECUACIÓN 3.1: Definición de dosado relativo

Se distinguen tres casos distintos:

- $\phi = 1$  : mezcla estequiométrica
- $\phi > 1$  : mezcla rica (en combustible)
- $\phi < 1$  : mezcla pobre (en combustible)

La mayoría de los combustibles son hidrocarburos fósiles, los cuales están compuestos básicamente por Carbono (C) e Hidrógeno (H). En nuestro caso de estudio, el combustible utilizado es Gas Propano, el cuál es un gas incoloro e inodoro, perteneciente a los hidrocarburos alifáticos (los alcanos). Su fórmula química es  $C_3H_8$ . La llama del propano al igual que la de los demás gases combustibles debe de ser completamente azul; cualquier parte amarillenta, anaranjada o rojiza de la misma denota una mala combustión. A temperatura ambiente es inerte frente a la mayor parte de los reactivos aunque reacciona por ejemplo con el bromo en presencia de luz. En elevadas concentraciones el propano tiene propiedades narcotizantes.

### 3.3 LLAMAS ESTABILIZADAS POR GIRO

El fenómeno del swirl (giro o remolino) se produce en ciertos quemadores de manera no intencionada provocando entonces llamas con comportamientos inestables debidos a la unión de un movimiento de flujo oscilatorio con una combustión inestable, lo que provoca la autoexcitación de la llama que genera un elevado aumento de la variación de presión dentro de la cámara de combustión.

Sin embargo, desde hace varios años se conocen los efectos que produce el giro en el flujo y las ventajas que este giro puede provocar en cuanto a la estabilización de la llama en la cámara de combustión. Gracias a la estabilización por swirl se consigue generar mucha potencia térmica en un volumen reducido, lo cual representa un gran avance para la industria aeronáutica, al conseguirse cámaras de combustión muy compactas y ligeras que generen la potencia suficiente; además, se dedican grandes esfuerzos en conseguir coeficientes aerodinámicos lo más reducidos posibles.



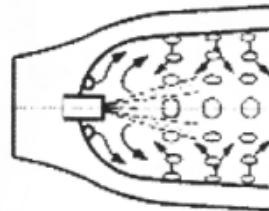
FIGURA 3.2: Turbina de gas aeronáutica<sup>[13]</sup>



La combustión siempre se propaga en la dirección de los reactantes frescos, que en la mayoría de casos corresponde a la zona más rica. Por tanto, la llama se estabilizará si la velocidad de propagación de la llama local es igual y contraria a la del flujo de reactantes. Por ello, la velocidad de inyección de los reactantes queda fuertemente restringida, lo que requiere secciones de paso y tamaños del quemador mayores que si se empleara como inyector un chorro premezclado tradicional. Por todo ello, la estabilidad de la llama en una cámara de combustión es un aspecto fundamental a tener en cuenta para el buen funcionamiento de una turbina de gas, consiguiéndose así una larga vida útil, un rendimiento óptimo y unas emisiones contenidas.

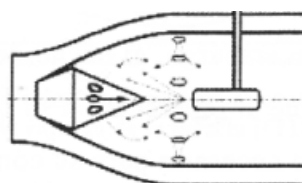
Existen varias formas de estabilizar la llama, consiguiendo igualar la velocidad de propagación de la llama y la de los reactantes en una determinada zona del flujo:

1. Introduciendo la mayor parte del aire primario a través de las paredes laterales del tubo de llama a cierta distancia del inyector y dirigiéndola hacia éste se consigue una adecuada distribución, tanto de la corriente en la zona de combustión como de la estabilidad de la llama.



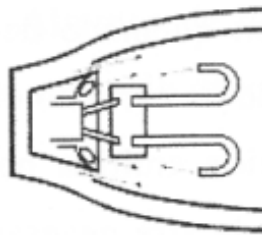
**FIGURA 3.3: Distribución adecuada de corrientes** <sup>[4]</sup>

2. Inyección en contracorriente: este tipo de inyección proporciona un buen mezclado del combustible con el aire primario debido a los esfuerzos cortantes y una zona de baja velocidad donde se puede estabilizar la llama. Tiene la desventaja de recalentar mucho el inyector (por lo que se suele necesitar un sistema de refrigeración) y una excesiva acumulación de hollín, tapando parcialmente el inyector, lo que explica su desuso.



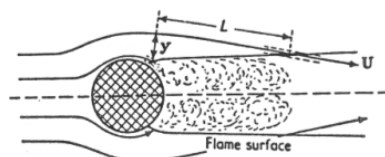
**FIGURA 3.4: Cámara con inyector a contracorriente** <sup>[4]</sup>

3. Inyectando el combustible a baja presión en unos tubos en forma de bastón situados en la zona primaria. De estos tubos sale una mezcla de aire y combustible rica en sentido contrario al flujo, mezclándose con el aire primario restante que sale de unos orificios situados en una pantalla, alrededor de los conductos de suministro de combustible. El mayor problema reside en la formación de depósitos de carbón en los tubos del vaporizador.



**FIGURA 3.5: Cámara con tubos a baja presión a contracorriente** <sup>[4]</sup>

4. Utilizando superficies estabilizadoras: se consigue generar una zona de recirculación o de baja velocidad cerca del estabilizador, lo que genera un punto de remanso cerca del cual puede estabilizarse el frente de llama. La manera más simple de conseguir esta recirculación es introducir un obstáculo en la corriente ("flame holder" si el obstáculo es de pequeño tamaño o "bluff body" si el obstáculo bloquea una sección importante del inyector). El problema es que se genera mucha carbonilla que se deposita en la parte posterior de la superficie, recalienta la misma (haciendo necesario un sistema de refrigeración o uso de materiales cerámicos caros) y una gran pérdida de carga.



**FIGURA 3.6: Propagación del flujo en el bluff body** <sup>[4]</sup>

5. Mediante un torbellino o "Swirl" (giro en inglés): En este caso, el combustible se inyecta en la misma dirección axial que la corriente de aire,

mientras que el aire primario se introduce generalmente a través de unos álabes radiales torsionados, creándose una corriente que gira dentro de la cámara de combustión. En determinadas condiciones, este giro provoca la apertura o divergencia de la llama, lo que origina en la parte central del quemador una zona de recirculación.

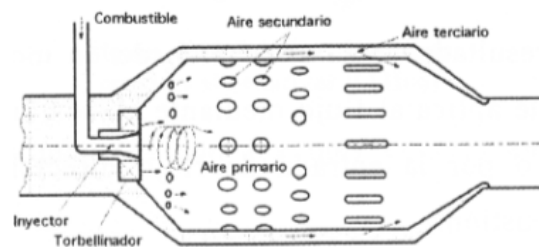


FIGURA 3.7: Cámara con swirl <sup>[4]</sup>

A excepción de la estabilización de llama por giro, el resto de métodos tienen una serie de inconvenientes comunes: una pérdida de presión relativamente elevada (nada deseable en turbinas de gas, de cara a la eficiencia de las mismas), deposiciones de carbonilla y un calentamiento muy importante de las superficies estabilizadoras.

Es por ello que la tecnología actual de combustión en turbinas de gas prefiere hoy en día emplear los quemadores estabilizados por swirl, cuyas ventajas son:

- Caída de presión relativamente pequeña.
- Buena mezcla del combustible con el aire, resultando así una combustión relativamente limpia, reduciendo las emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos sin quemar.
- Disminución de la temperatura de la llama, lo que implica un descenso de los  $\text{NO}_x$ . Este aspecto es de mayor importancia, ya que la presión de los distintos organismos gubernamentales para la reducción de emisiones de  $\text{NO}_x$  ha convertido en un reto tecnológico la evolución de este tipo de quemadores.

Sin embargo, y a pesar de su utilización en turbinas de gas de nueva generación, sigue siendo aún una tecnología en desarrollo, ya que la complejidad del flujo

tridimensional y el fenómeno de rotura de vórtice pueden comprometer la estabilidad de la llama.

### 3.4 GENERACIÓN DEL GIRO O SWIRL

El swirl es el resultado de la aplicación de un movimiento espiral, el cuál se aplica al flujo mediante álabes, usando entradas axiales y tangenciales combinadas o por la entrada de flujo directamente tangencial a la cámara de combustión.

Mediante estudios experimentales se ha comprobado que el swirl produce grandes efectos en la forma del flujo, consiguiéndose reducir el tamaño de la llama, su temperatura y la distribución de transferencia de calor.

Además de en turbinas de gas, el flujo con swirl es utilizado en muchas otras aplicaciones con objeto de mejorar la eficiencia del mezclado y la disminución de las emisiones contaminantes en la combustión. Uno de las aplicaciones más comunes es la generación del swirl en las cámaras de combustión en los motores de combustión interna, ya sea en motores gasolina o diésel.

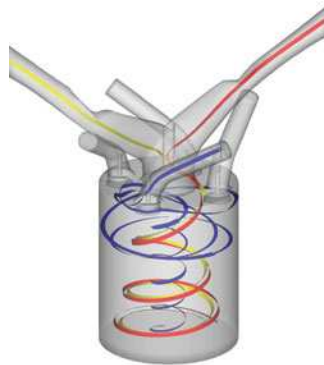


FIGURA 3.8: Aplicación de swirl en motor alternativo <sup>[14]</sup>

Existen tres métodos esenciales para la generación del swirl:

1. Mediante álabes: La escasa caída de presión que este método provoca lo convierte en el más utilizado por los fabricantes de quemadores. Consiste en un tubo por el que pasa el flujo axial en el que se han introducido unos

álabes que provocan que el flujo cambie su dirección (defleca la corriente) en su paso por los mismos con objeto de que salga girando. El grado del swirl generado dependerá de la inclinación de los álabes.

2. Mediante rotación directa: consiste en hacer girar sobre su eje un cilindro por el que pasa un fluido; debido a la viscosidad de dicho fluido, parte de él gira con el cilindro mientras que va recorriendo longitudinalmente el tubo. El grado de swirl generado depende de la velocidad de giro del tubo y de la viscosidad del fluido. Sin embargo, este método no es adecuado para generar swirl en fluidos poco viscosos como el aire.
3. Mediante un flujo tangencial y otro axial: se introduce parte del fluido de forma paralela al eje (en la dirección axial) de la cámara y otra parte de forma tangencial al mismo, lo que provoca el giro de la corriente. El giro se controla sencillamente variando la proporción de cada flujo introducido en la cámara. Otra manera de modificar el giro sería acercar o alejar la salida de flujo tangencial respecto al centro de la cámara, consiguiendo así grandes variaciones del momento angular.

### 3.5 NÚMERO DE SWIRL

En estudios de chorros a los que se aplica un giro se hace necesario definir un número adimensional característico del giro con objeto de poder comparar diferentes chorros. Podría definirse este parámetro como el cociente entre las velocidades tangenciales y axiales medias, pero dichas cantidades no se conservan en el chorro. Por ello, resulta más cómodo y práctico usar el momento angular y la cantidad de movimiento lineal, ambas magnitudes siendo conservadas en el flujo. El número de swirl  $S$  se define entonces como el cociente entre el flujo axial de momento angular y el flujo axial de momento lineal (multiplicado por el radio de salida).

$$S = \frac{G_{\theta}}{G_x \cdot R_0}$$

ECUACIÓN 3.2: Número de Swirl

Dónde:

- $G_\theta$  es el flujo axial de momento angular.

$$G_\theta = \int_0^\infty (\rho u w + \overline{\rho u' w'}) r^2 dr$$

**ECUACIÓN 3.3: Flujo Axial de momento angular**

- $G_x$  es el flujo axial de momento lineal, incluyendo la dirección x de esfuerzos turbulentos normales y un término de presión (empuje axial)

$$G_x = \int_0^\infty (\rho u^2 + \overline{\rho u'^2} + (p - p_\infty)) r dr$$

**ECUACIÓN 3.4: Flujo Axial de momento lineal**

- $R_0$  es el radio de la tobera

Además, (u,v,w) son las componentes de la velocidad (x,r,  $\theta$ ) en sistemas de coordenadas cilíndricas.

Para números de swirl bajos ( $S \leq 0,4$ ) el flujo que sale por la tobera tiende a abrirse más que un chorro libre, debido a que entra más fluido del ambiente. Esto se debe a la acción de la fuerza centrífuga, que generan gradientes radiales de presión; si embargo, estos gradientes de presiones radiales no son tan importantes como los gradientes producidos axialmente, por lo que el chorro se sigue comportando globalmente como un chorro axial.

Para valores de swirl más altos ( $S \geq 0,6$ ) se comienza a generar una zona de recirculación radial / axial, originando la formación de una zona central de recirculación toroidal como consecuencia de la apertura del flujo debida a su rotación. Se genera una zona de baja presión lo suficientemente crítica como para hacer que parte del flujo cambie su dirección y se dirija hacia ella, lo que genera la recirculación. En este caso, existen elevados gradientes de presión axiales y radiales.

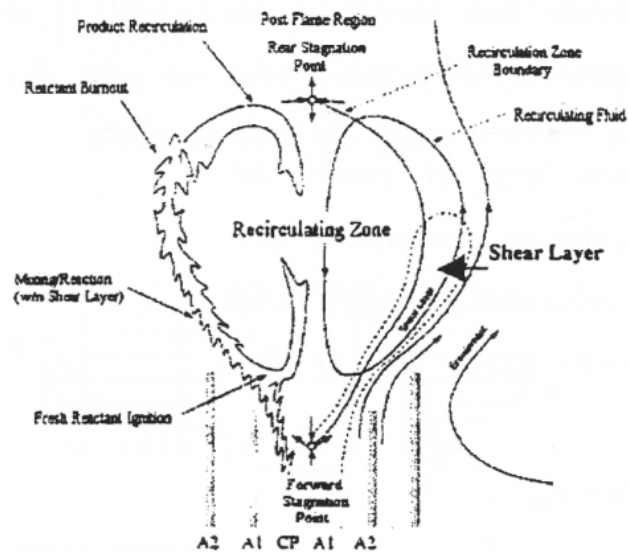


FIGURA 3.9: Zona de recirculación <sup>[15]</sup>

Esta burbuja de recirculación desempeña un papel fundamental en la estabilización de la llama, ya que provoca un flujo caliente de recirculación que ocasiona una disminución de la velocidad del flujo, lo que origina el equilibrio entre la velocidad del flujo y de la llama. Además, se produce una recirculación de los gases calientes ya quemados que permiten una mejor combustión y disminuir las emisiones de  $\text{NO}_x$ .

### 3.6 TIPOS DE QUEMADORES

La generación del swirl mediante álabes no es muy conveniente para el caso a estudiar debido a los siguientes aspectos:

- Al estabilizar la llama dentro de la tobera, el acceso a la llama para la realización de las mediciones es muy complicada, ya sean mediciones ópticas o acústicas.
- Se trata de una configuración muy poco flexible a la hora de cambiar el número de swirl.
- Resulta muy poco eficiente para números de Swirl bajos y medios.
- Inducen estelas en el flujo y rompen la simetría de revolución del quemador.

Por estos motivos, se prefirió un diseño con entradas axiales y tangenciales para la generación del Swirl, por tratarse de un diseño mucho más flexible que permite incluir en el eje un chorro axial para así “levantar” la llama por encima de la tobera. Así se consigue estabilizar la llama en una zona de recirculación débil y levantada, lo que ofrece las siguientes ventajas:

- Al desprender la llama de las partes sólidas del quemador, no existe peligro de recalentamiento con necesidad de refrigeración.
- La posición levantada de la llama facilita un buen acceso óptico y acústico a la zona de recirculación para la realización de medidas.
- Resulta muy eficiente para bajos swirl.

Además, se trata de un sistema muy versátil, que permite variar fácilmente la generación del swirl. Por todo ello, el sistema utilizado en el laboratorio es la generación de swirl utilizando un flujo axial y otro radial.

### 3.7 DESCRIPCIÓN DEL QUEMADOR

El diseño final se corresponde con el mostrado en la figura 3.10. El giro se genera en la cámara gracias a dos tubos que entran en ella y acaban con dos codos a 90°. Un tubo central canaliza la mezcla desde la base de la cámara hacia el exterior. Este diseño con una pre-cámara cilíndrica permite homogeneizar la mezcla y las velocidades antes de su salida al exterior.

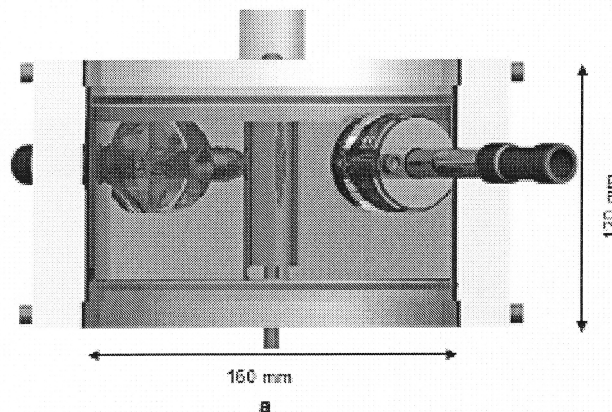


FIGURA 3.10: Diseño del quemador <sup>[10]</sup>



Con este diseño, se puede variar la cantidad de swirl tan solo modificando la relación de caudal que pasa por las entradas tangenciales y la axial. Las entradas tangenciales son ajustables en cuanto a su radio de entrada en la cámara de vientos. Por tanto, el swirl se puede modificar o bien variando el radio de entrada de estos dos tubos en la cámara o bien cambiando la proporción de caudal axial / tangencial, lo cual se consigue mediante el ajuste de la apertura de una válvula que regula el caudal de flujo axial.

## CAPÍTULO 4

# VELOCIMETRÍA POR IMÁGENES DE PARTICULAS (PIV)

### Índice general

---

4.1	INTRODUCCIÓN.....	31
4.2	VELOCIMETRÍA LÁSER .....	32
4.3	MÉTODOS DE VELOCIMETRÍA LÁSER.....	33
4.4	ADQUISICIÓN DE IMÁGENES .....	36
4.5	FUNDAMENTOS DEL PIV.....	39
4.6	PIV ESTEREOSCÓPICO .....	45
4.7	GENERALIDADES DEL LÁSER .....	47
4.8	ELECCIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE SEMBRADO .....	54

---

## 4.1 INTRODUCCIÓN

Durante el siglo XX se hizo patente la necesidad tecnológica de determinar ciertas propiedades físicas de objetos lejanos, tales como el tamaño, la posición, la temperatura o la velocidad. Desde la propuesta de Guglielmo Marconi en 1922 para utilizar las ondas electromagnéticas como sondas exploradoras hasta nuestros días, la inspección lejana de objetos se ha convertido en un campo de gran interés para múltiples tecnologías.

La invención del radar durante la Segunda Guerra Mundial supuso un avance tecnológico enorme en este sentido, basándose su funcionamiento en dispositivos de generación y confinamiento de ondas electromagnéticas de muy alta frecuencia.

Estos avances inspiraron el desarrollo de la tecnología láser, apareciendo así en 1961 el primer láser de onda continua, ya que todas las propiedades básicas de las ondas de radio propias de los radares son perfectamente extrapolables a la tecnología láser para la detección de diferentes tipos de blancos. Se trataba de sustituir el emisor de ondas por un láser, la antena por lentes y el receptor por fotodetectores.

Se conseguía así poder detectar blancos muy pequeños (del orden de las decenas de micrómetros) con una alta precisión en las medidas, pudiendo así estimar diferentes características de distintos tipos de fluidos tales como velocidad o temperatura. Además, esta técnica cuenta con la gran ventaja de que todas las medidas pueden ser realizadas sin necesidad de introducir parte de la sonda de medida dentro del fluido (medidas no intrusivas), lo que previene de cualquier tipo de distorsión del flujo.

Hoy día, podemos clasificar los láseres en función de las aplicaciones que han de realizar según dos criterios:

- Tipo de emisión: Onda continua o pulsados
- Medio: Gas (CO<sub>2</sub>, HeNe, etc.), estado sólido (YAG, YLF, etc.) o semiconductores.

## 4.2 VELOCIMETRÍA LÁSER

Para el desarrollo científico y tecnológico de numerosos procesos se hace necesaria una técnica de medida capaz de detectar la distribución de velocidad de un determinado área de un campo fluido. Esto permite obtener un mejor conocimiento del comportamiento de los fluidos y determinar la estructura y propiedades de las turbulencias en determinadas condiciones hidrodinámicas y aerodinámicas.

Hasta el desarrollo de la tecnología láser, los científicos disponían de sensores mecánicos, de presión (tubo de Pitot) o eléctricos (anemómetro de hilo caliente), aunque con una serie de inconvenientes y limitaciones importantes:

- Tubo de Pitot: mala resolución espacial y reducida resolución temporal, por lo que solo es capaz de determinar el campo medio de velocidades mediante medidas punto a punto y no de forma global. Relativamente alta intrusividad. Solo mide una componente de la velocidad.
- Anemómetro de hilo caliente: se utilizan para la obtención de espectros turbulentos dada su excelente resolución temporal, pero el problema es que solo determina la magnitud de la velocidad, y no su dirección. Existen sondas para la medida simultánea de varias componentes de la velocidad. Excelentes para determinar las características de la turbulencia. Posibilidad de medidas multi-punto para correlación espacial. Relativamente baja intrusividad.

Ambas técnicas son intrusivas, lo que genera perturbaciones en el flujo al introducir una sonda en el objeto de estudio. Además, no soportan altas temperaturas.

En cambio, los métodos ópticos no son intrusivos (o mínimamente intrusivos si se han de introducir trazadores), lo que implica grandes ventajas en el estudio de estructuras altamente sensibles a perturbaciones internas.

Existen dos métodos de medida de velocidad a través del láser en función de si la dispersión de energía se debe a las propias moléculas del fluido o a partículas trazadoras (sembrado):

- Los sistemas basados en la medida de energía dispersada directamente por las moléculas que integran el propio fluido son muy poco utilizadas debido a su falta de precisión y a su pobre potencia dispersada.
- Los sistemas basados en la detección de la energía dispersada por partículas trazadoras son los más utilizados, dado a que proporcionan mucha mayor precisión debido a la mayor energía disipada por las partículas, lo que permite la utilización de láseres menos potentes.

En este caso, un aspecto a tener muy en cuenta será la elección del sembrado. Los efectos de inercia de las partículas (problema importante dado que pueden degradar la calidad de las medidas) y el grado de confianza en el caso de fluidos turbulentos limitan la resolución espacial si no se cumple con una serie de requisitos en función del tamaño del sembrado y de la velocidad del fluido.

### **4.3 MÉTODOS DE VELOCIMETRÍA LÁSER**

Los métodos más utilizados para la determinación del comportamiento del campo fluido y de la estructura y propiedades de las turbulencias en determinadas condiciones hidrodinámicas y aerodinámicas se basan en tres principios:

#### **4.3.1 MEDIDA DEL TIEMPO DE VUELO**

Si conocemos el tamaño de la zona iluminada sobre el fluido y por ella atraviesa una partícula, midiendo el tiempo que tarda en cruzar la zona de dispersión podemos obtener la velocidad del trazador en esta zona. Estos tipos de velocímetros se conocen como LTA o LTV (Laser Transit Anemometer / Velocimeter). Su principal inconveniente es una pobre precisión y la dificultad de obtener una buena caracterización de la turbulencia.

#### **4.3.2 MEDIDA DEL DESPLAZAMIENTO DOPPLER**

Si tenemos un objeto (partícula trazadora) en movimiento cruzando la zona de medida o iluminación formada por franjas de interferencia en movimiento, el fenómeno Doppler aparece en el receptor como un desplazamiento frecuencial en la energía dispersada por el blanco respecto a la frecuencia incidente. Midiendo esta desviación en frecuencia podemos obtener la velocidad del trazador, de hay el nombre de la técnica: LDA / LDV (Laser Doppler Anemometry / Velocimetry).

Esta técnica de velocimetría puntual (el volumen iluminado es del orden de 100 micrómetros o menor) presenta una excelente resolución temporal, lo que la convirtió en una técnica de mucho éxito en los pasados 25 años. A pesar de la alta resolución temporal, presenta el inconveniente ser una medida puntual y no global; es decir que no presenta la estructura instantánea del flujo.

#### **4.3.3 MEDIDA DEL ESPACIO RECORRIDO POR EL TRAZADOR**

Si conocemos el tiempo que transcurre entre dos posiciones diferentes de una partícula en movimiento, a partir de la iluminación del blanco por una fuente de luz adecuada y registrando dichas posiciones en uno o varios fotogramas para dos instantes de tiempo consecutivos, podemos estimar su velocidad instantánea midiendo los desplazamientos de las partículas. Además, esta velocidad no sólo corresponde a un punto del fluido, sino que se obtiene para todo el plano de iluminación, obteniéndose una muy buena visualización de la estructura instantánea del fluido mediante procesamiento de imágenes. A estos sistemas se les denominan PTV (Particle Tracking Velocity) si los desplazamientos se evalúan a partir de parejas de partículas individuales o PIV (Particle Image Velocimetry) si el desplazamiento se estima a partir de correlación estadística de un conjunto de partículas. Si las imágenes de partículas se registran con dos ángulos distintos, mediante la utilización de dos cámaras, se puede determinar la componente de la velocidad perpendicular al plano de iluminación. Este sistema se denomina estereoscópico.

### 4.3.4 COMPARACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE MEDIDA

Se muestran en la siguiente imagen las diferentes técnicas actualmente más utilizadas en la medida óptica de velocidad. Se indica para cada una de ellas el número de componentes de la velocidad que permiten medir (u,v,w), en que dimensiones espaciales pueden realizar medidas (x,y,z), y si son capaces de obtener evoluciones temporales (t). Además, se incluye otro parámetro o característica del blanco, el diámetro de las partículas inmersas en el fluido (d).

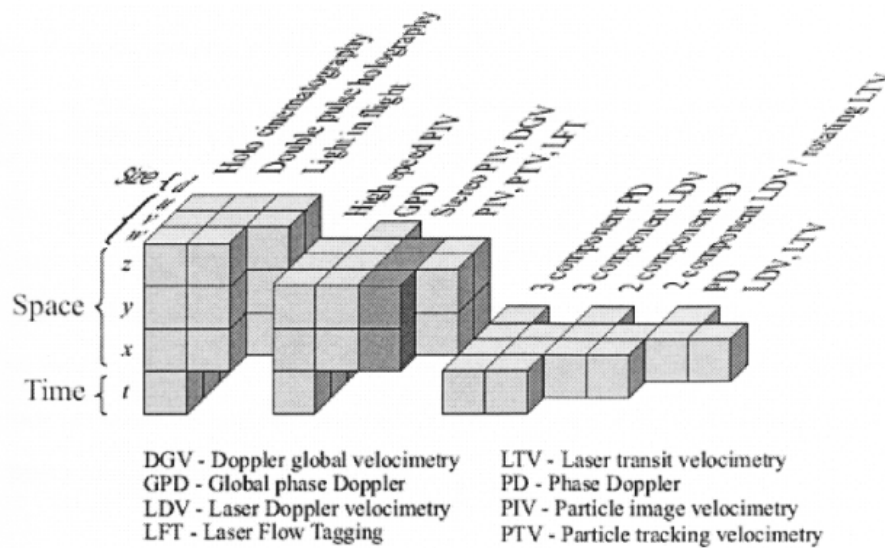


FIGURA 4.1: Diferentes técnicas de velocimetría ópticas [16]

A medida que nos desplazamos a la izquierda en este diagrama, aumentan las prestaciones del sistema, pero también aumenta mucho la complejidad del sistema de medida y el coste de adquisición del material necesario. Como puede observarse, el PIV estereoscópico se halla resaltado con un tono más oscuro en el centro del diagrama. Esta técnica permite medir con buena precisión las tres componentes de la velocidad (3C) en un plano (2D), además de tratarse de una herramienta con el nivel de precisión, la capacidad de medida y la robustez necesaria para el estudio de flujos no isoterms y con altos gradientes de velocidad. Por sus altas prestaciones decidimos utilizar esta técnica de medida para caracterizar el flujo que nos interesa.

A continuación se detallan los fundamentos de esta técnica y sus diferentes componentes.

## 4.4 ADQUISICIÓN DE IMÁGENES

Desde la aparición de la técnica PIV, este sistema ha evolucionado enormemente como consecuencia de diversos avances tecnológicos. Entre ellos destacan por uno lado la evolución de los equipos informáticos, que permiten disponer de equipos con una velocidad y capacidad de procesamiento mucho mayores, y por otro, la aparición de sensores CCD con una resolución especial cada vez mayor, que ha contribuido a la sustitución del método de registro en película fotográfica, que resultaba muy lento y laborioso, por el de cámaras CCD.

A pesar de que los sistemas actuales de adquisición de imágenes para PIV tienen una resolución menor que el tradicional método de película fotográfica, ofrecen numerosas ventajas como son la capacidad de verificar las imágenes en tiempo real y el hecho de la eliminación del proceso de revelado. Además, la tecnología CCD de doble capa permite adquirir 2 imágenes de partículas en 2 archivos distintos con tiempos muy cortos entre dos exposiciones. Este avance permite usar la correlación cruzada incluso para altas velocidades o áreas de medida muy pequeñas (micro PIV).

### 4.4.1 TECNOLOGÍA CCD

Las cámaras CCD (Couple Charge Device) tienen como componente principal una placa electrónica semiconductor de silicio fotosensible, con cientos de filamentos ordenados en malla, creando millones de diminutos fotodiodos sensibles a la luz que definen el elemento básico de la imagen: el píxel (Picture Element), que al ser estimulados por la energía luminosa, liberan electrones que producen una carga eléctrica, que una vez registrada permite codificar la imagen.

Mediante una señal de reloj procedente del circuito integrado de la cámara, la carga que posee uno de estos fotodiodos va pasando de éste al adyacente y así sucesivamente hasta llegar a un registro que es el encargado de ir suministrando, por orden secuencial, las diferentes cargas que poseen los distintos fotodiodos que forman el sensor. Estas cargas electrónicas se convierten en potencial eléctrico, que se amplifica y se recoge en



el circuito integrado de la cámara, encargado de procesar estos datos y proporcionar una señal digital.

En ocasiones, para aumentar la resolución de la cámara, se sitúan varios chips CCD's uno junto al otro, con lo que se consigue aumentar la resolución sin incrementar excesivamente el coste de la cámara ya que se utilizan varios chips estándares, normalmente de 1 Megapíxel cada uno. En el caso presente, cada cámara consta de una cuatro sensores CCD, de 1 Megapíxel cada uno, dispuestos en forma de matriz.

Las principales ventajas del CCD son la alta eficiencia cuántica (cociente entre el número de pares electrón-agujero creados y leídos satisfactoriamente por cada fotón entrante), la respuesta lineal, el tamaño reducido y la capacidad de suministrar las imágenes de salida en formato digital.

Sin embargo, también conllevan una serie de inconvenientes, entre los que podemos destacar:

- El ruido fotónico. Debido a la naturaleza cuántica de la luz, es mayor con escasa iluminación. Los fotones no llegan al sensor de manera perfectamente homogénea, luego a menor iluminación es más evidente esta pequeña heterogeneidad.
- El límite de saturación. Cuando los fotones no pueden arrancar más electrones porque se ha llegado al máximo de la capacidad del píxel, obteniéndose una señal falsa. Al ser sobre expuesto, el elemento sensible también se puede deteriorar o destruir.
- La existencia de electrones térmicos que no provienen de la incidencia de fotones sino de la agitación térmica del propio elemento, por lo que a menores temperaturas se reduce el ruido térmico. En nuestro caso, el fotodiodo trabaja a una temperatura de unos  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  (gracias a una célula Peltier) con objeto de aumentar su sensibilidad; esta baja temperatura ayuda a su vez a reducir el ruido térmico.

#### **4.4.2 DEFORMACIÓN DE LA IMAGEN**

Sin embargo, el algoritmo “multi-grid” no resuelve adecuadamente gradientes importantes de velocidad. La predicción del campo de velocidades en un paso no es más que una estimación estadística del promedio de las velocidades en ventanas más pequeñas, por lo que sigue presente el problema de pérdida de parejas de partículas y sobretodo la deformación del patrón de partículas entre dos imágenes.

Para solucionarlo, se utiliza una técnica consistente en deformar la imagen entera según la predicción del desplazamiento. A partir del campo de velocidad existente, el algoritmo calcula un vector de deformación para cada píxel. Este proceso puede repetirse iterativamente para un mismo tamaño de ventana hasta que el desplazamiento calculado sea nulo.

El vector desplazamiento final será la suma de todas las correlaciones que se han debido aportar para obtener dos imágenes idénticas.

#### **4.4.3 FILTRO PASA BAJO**

El problema principal de los algoritmos de deformación de la imagen es el crecimiento de las inestabilidades para longitudes de onda pequeñas. Para evitarlo, se suele emplear un filtro pasa bajo entre iteraciones que elimina las altas frecuencias

#### **4.4.4 DISPOSICIÓN DE LAS CÁMARAS**

Otro aspecto importante es la disposición de las cámaras respecto al plano de iluminación. Una posible configuración es aquella en la que se sitúa una cámara detrás de dicho plano y otra delante del mismo (respecto a la dirección de propagación de la luz). Así, la cantidad de luz recibida por las dos cámaras es distinta debido al patrón de dispersión de Mie de las partículas. Por lo tanto, la intensidad luminosa recibida por una de las cámaras será mucho menor que en la otra, por lo que esta configuración no suele utilizarse. En su defecto, suelen utilizarse otros dos tipos de configuraciones, bien sea con ambas cámaras detrás del plano de iluminación (Backward-Backward scattering) o

bien con ambas cámaras delante (Forward-forward scattering). Esta última configuración hace que las dos cámaras reciban más luz dispersa.

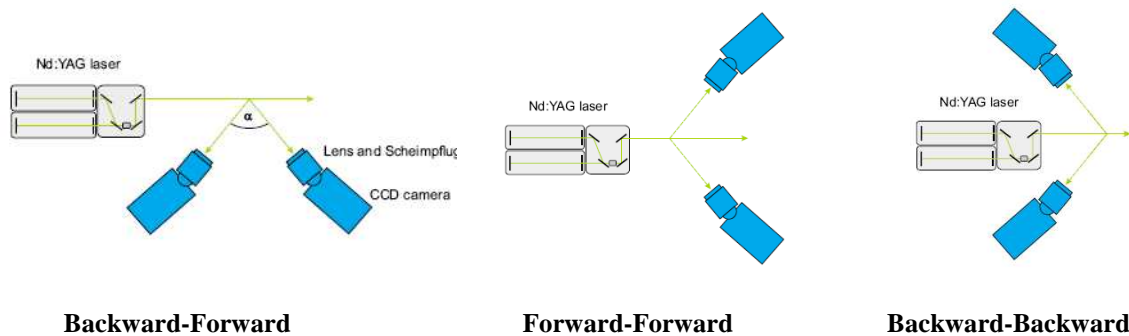


Figura: Distintas disposiciones de cámaras <sup>[16]</sup>

#### 4.5 FUNDAMENTOS DEL PIV

En la velocimetría por imágenes de partículas, el movimiento del fluido es hecho visible agregando al flujo pequeñas partículas inertes, típicamente aerosoles de gotas de aceite o de agua en aire o partículas sólidas en líquidos o gases a alta temperatura, cuya densidad sea lo más similar posible a la del fluido en la que están inmersas. Estas partículas son iluminadas en un plano por lo menos dos veces en un breve instante de tiempo  $\Delta t$ . Dicha luz suele ser generada con un haz láser utilizando una lente cóncava cilíndrica para formar así el plano de iluminación. La luz dispersada por las partículas es grabada por cámaras CCD permitiendo así registrar las posiciones de cada partícula en cada pulso de iluminación.

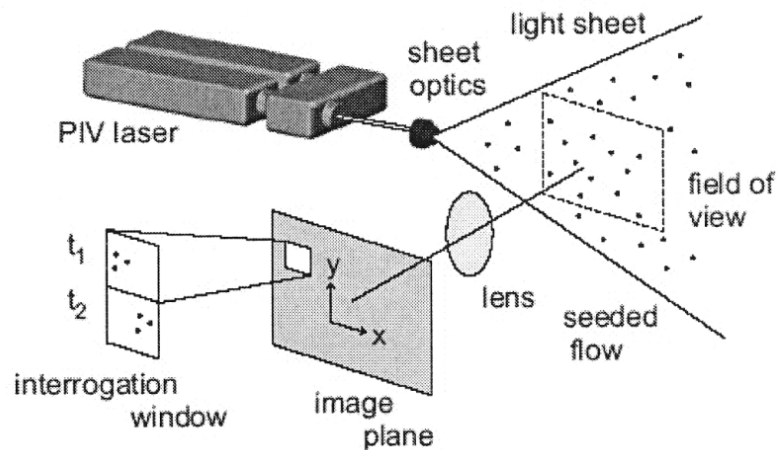


FIGURA 4.2: Instalación general para medición con PIV <sup>[5]</sup>

La fuente de luz tiene que ser suficientemente intensa para que se puedan detectar las partículas, típicamente se utilizan haces de láser pulsados (tipo Nd:YAG), con una óptica basada en lentes cilíndricas que permita la formación de un plano para conseguir una hoja fina de luz intensa. Entre otras características, los láseres pulsados ofrecen la ventaja de generar pulsos de luz muy breves e intensos y repetitivos a frecuencias relativamente altas (generalmente en torno a 10 Hz, pero puede ir hasta varias decenas de kHz). La iluminación no ha de ser necesariamente pulsada, sino que puede ser continua y utilizarse cámaras con una velocidad de obturación muy rápida (para evitar exposiciones demasiado largas) para registrar la posición de las partículas en distintos instantes.

A partir del intervalo de tiempo  $\Delta t$  entre las iluminaciones y del campo de desplazamientos  $\Delta X$  definido por la posición de las partículas en cada una de ellas, se pueden determinar los vectores de la velocidad  $u(X,t)$  de los trazadores como la media del desplazamiento de las partículas trazadoras iluminadas en la zona de estudio, es decir:

$$u(X,t) = \frac{\Delta X(x,t)}{\Delta t} \quad (4.1)$$

Para determinar el desplazamiento de las partículas, que a su vez servirá para determinar la velocidad local del flujo, el método de análisis más comúnmente utilizado es la correlación estadística.

Dependiendo del tipo de adquisición, existen diversas maneras de computar el campo de vectores. Para el caso más común de dos pulsos de iluminación, el desplazamiento de las partículas entre ellos se puede registrar en una sola imagen expuesta dos veces (“single-frame”) o en fotogramas distintos (“multi-frame”). En el primer caso, hay que utilizar técnicas de auto-correlación para analizar el campo de desplazamientos, quedando una indeterminación sobre el sentido del desplazamiento. El caso de “multi-frame” se analiza con técnicas de correlación cruzada que aportan información más completa (magnitud, dirección y sentido del desplazamiento), pero que necesitan de un equipo de adquisición más costoso para conseguir la velocidad de repetición adecuada.

#### 4.5.1 TÉCNICAS DE CORRELACIÓN

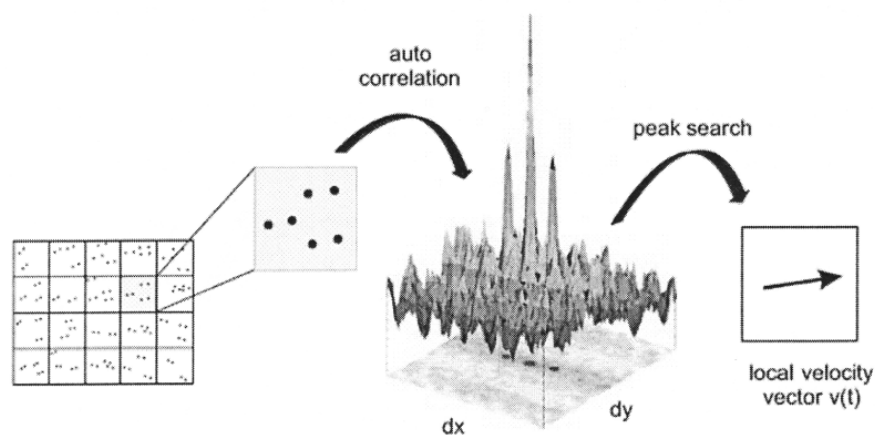
La correlación no establece el desplazamiento de cada una de las partículas, sino que determina el desplazamiento más probable del conjunto de partículas contenidas en divisiones, normalmente cuadradas, distribuidas en forma de malla uniforme sobre la imagen de partículas. A cada una de estas divisiones se las llama “ventanas de interrogación”

Existen dos métodos principales de correlación, la correlación cruzada y la autocorrelación.

#### 4.5.2 AUTO-CORRELACIÓN

En la auto-correlación, la imagen se correlaciona consigo misma ya que se trata de una imagen de partículas doblemente expuesta, es decir, consta de dos imágenes para cada partícula. Esta técnica se utilizaba cuando las cámaras CCD (Coupled Charge Device) no permitían descargar la imagen en un tiempo inferior a  $\Delta t$ .

En la figura 4.2 se muestra un ejemplo de auto-correlación de la imagen. La imagen completa adquirida por el sensor fotográfico digital (sensor CCD) se divide en una matriz de ventanas de interrogación, donde se realiza la correlación.



**FIGURA 4.3: Ejemplo de auto-correlación en una imagen doblemente expuesta** <sup>[3]</sup>

En la imagen pueden observarse tres picos, uno máximo primario, que indica el origen de la medida en el plano de correlación, y dos máximos secundarios situados

simétricamente respecto al primero. La distancia del máximo primario respecto a los secundarios indica el desplazamiento de la partícula. Este hecho representa el mayor inconveniente de este método, ya que al presentar dos picos simétricos, no se sabe cual de ellos corresponde al desplazamiento real de las partículas (problema denominado ambigüedad direccional).

Este método es hoy en día una técnica en desuso gracias a los avances en cámaras digitales. La creación de cámaras CCD de doble capa (una de almacenamiento y otra de adquisición) permitió adquirir dos imágenes digitales en un intervalo de tiempo de hasta un microsegundo e hizo accesible la correlación cruzada.

#### 4.5.3 CORRELACIÓN CRUZADA

La correlación cruzada consiste en efectuar la correlación entre las ventanas de interrogación de dos imágenes de PIV correspondientes a dos pulsos láser.

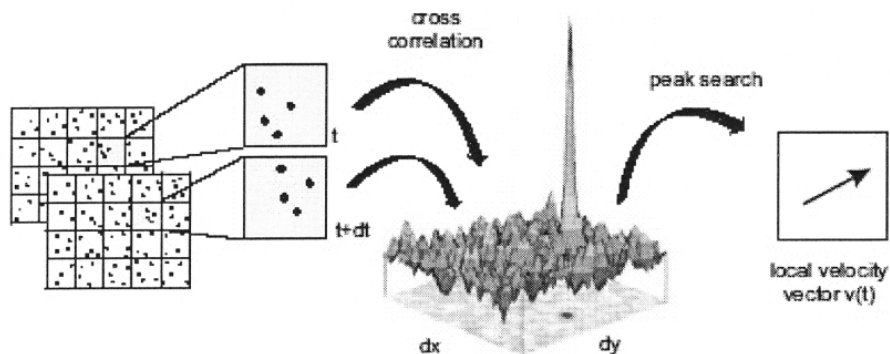


FIGURA 4.4: Correlación cruzada para una ventana de interrogación <sup>[3]</sup>

Igual que para la auto-correlación, las imágenes de PIV se dividen en subzonas pequeñas (ventanas de interrogación) que permiten calcular el vector de desplazamiento correspondiente a cada pareja de ventanas usando técnicas estadísticas de correlación. Teóricamente, el tamaño de esta ventana debería ser tal que todas las partículas dentro de ella se hayan movido de manera homogénea (misma dirección, magnitud y sentido). Sin embargo, no puede reducirse mucho el tamaño de las ventanas porque se necesita una decena de partículas como mínimo para hacer una correlación correcta.

Como se muestra en la Figura 4.4, la localización del pico más alto da la medida del desplazamiento de las partículas contenidas en la ventana de interrogación analizada.

La función de correlación  $C(s)$  de las intensidades  $I_1(x)$  y  $I_2(x)$  de las ventanas de interrogación en los tiempos  $t_1$  y  $t_2=t_1+\Delta t$  viene dada por la expresión:

$$C(s_x, s_y) = \int I_1(x, y) I_2(x + s_x, y + s_y) dx \quad (4.2)$$

Donde  $x$  es la coordenada espacial en el plano imagen y  $s$  la coordenada espacial en el plano de la correlación.

En general, no suele hacerse la correlación de forma directa, dado que resulta muy costosa en términos de tiempo de cálculo. Por ello que dicha función se calcula mediante el algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier digital bidimensional (FTT: Fast Fourier Transform en inglés) sobre la imagen digital, como veremos a continuación.

La operación de correlación (4.3) puede expresarse de la forma:

$$C(s_x, s_y) = I_1(x, y) \circ I_2(x + s_x, y + s_y) \quad (4.3)$$

Donde el símbolo  $\circ$  indica el operador de correlación (producto de convolución).

Aplicando los teoremas de correlación para dos funciones, podemos pasar de la correlación en el plano espacial a una multiplicación en el plano de la frecuencia espacial, lo cual puede expresarse en la forma:

$$g(x, y) \circ h(x, y) \Leftrightarrow G(\xi, \eta) H^*(\xi, \eta) \quad (4.4)$$

Donde las letras capitales representan las transformadas de Fourier de las funciones  $g$  y  $h$ ; y  $*$  representa el conjugado complejo:

$$\begin{aligned} F\{g(x, y)\} &= G(\xi, \eta) \\ F\{h(x, y)\} &= H(\xi, \eta) \end{aligned} \quad (4.5)$$

De forma que tomando transformadas de Fourier y haciendo uso de las propiedades del producto de convolución, obtenemos:

$$C(s_x, s_y) = F^{-1} \{ F(u, v) G^*(u, v) \} \quad (4.6)$$

Donde  $F^{-1}$  expresa la transformada inversa de Fourier.

#### 4.5.4 CORRELACIÓN DE SEGUNDO ORDEN

En ocasiones, el ruido puede provocar picos del mismo orden de magnitud que el pico real, lo que dificulta enormemente la estimación de la posición de las partículas en el mapa de correlación.

Para evitarlo, se realiza una correlación de segundo orden, que consiste en un algoritmo que multiplica los mapas de correlación de dos ventanas levemente movidas de su posición inicial. Se toma una imagen y se calcula su correlación a un 25% a la izquierda de la original y lo mismo a un 25% a la derecha, con lo que obtenemos un solape del 50%. Las posiciones de los picos de correlación debe coincidir en ambas correlaciones, por lo que estas se multiplican, aumentando así la señal del pico real frente a posibles ruidos aleatorios, no correlacionados.

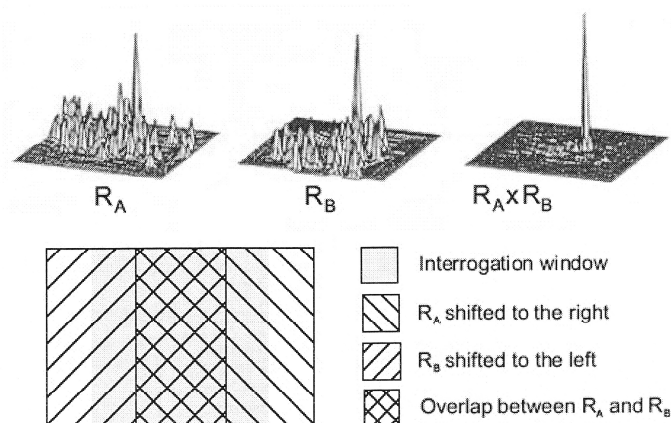


FIGURA 4.5: Correlación de segundo orden <sup>[3]</sup>



#### 4.5.5 ALGORITMOS “MULTI-GRID”

Un problema recurrente es la pérdida de parejas de partículas entre dos ventanas de interrogación debido al movimiento de las mismas o bien a desplazamientos muy elevados dentro de una misma ventana de interrogación.

Para solucionar este problema, se usa el algoritmo “multi-grid”, consistente en reducir iterativamente el tamaño de las ventanas de interrogación. Se calcula en primer lugar el campo de desplazamientos en ventanas de interrogación grandes (128x128 píxeles). Estos desplazamientos se utilizan como predicción para ventanas más pequeñas. Este proceso se repite hasta alcanzar el tamaño de ventana deseado (32x32 píxeles en nuestro caso).

### 4.6 *PIV ESTEREOSCÓPICO*

La velocimetría por imágenes de partículas, en su método clásico de PIV (2C-2D), tiene el gran inconveniente de que solamente es capaz de registrar las componentes de la velocidad contenidas en el plano de iluminación del láser, es decir, que es capaz de medir dos componentes de la velocidad (2C) a lo largo de un dominio bidimensional (2D). En este caso, velocidades fuera del plano no solo no pueden ser medidas, sino que, además, la componente de la velocidad perpendicular al plano de luz afecta la medida de las otras dos componentes con un error de proyección irrecuperable. Para flujos tridimensionales, este error puede llegar a causar errores significativos.

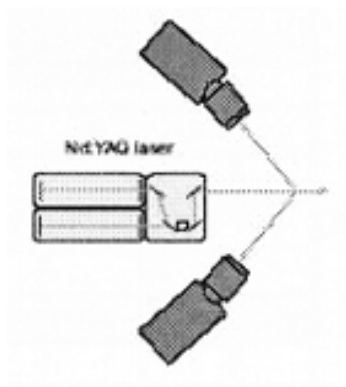
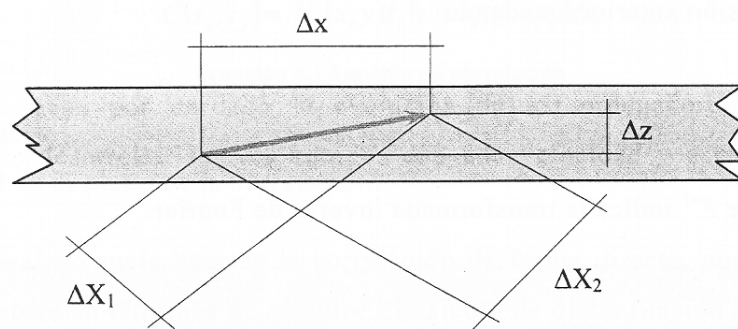


FIGURA 4.5: Ejemplo de configuración de estéreo PIV <sup>[3]</sup>

Una manera de obtener el sistema completo de componentes de la velocidad es utilizar una segunda cámara con otro ángulo de vista, técnica que se denomina PIV estereoscópico, o Stereo-PIV. Así, las dos cámaras, orientadas en ángulo respecto a la perpendicular al plano láser, dan ahora dos puntos de vista de las partículas. Usando los dos ángulos de vista se obtienen proyecciones del vector velocidad en dos planos diferentes. Es posible determinar las direcciones de proyección de ambas cámaras con una calibración, lo que permite recuperar información sobre la tercera componente y reconstruir el vector tridimensional, eliminando (o por lo menos reduciendo mucho) los errores de proyección.



**FIGURA 4.6: Ejemplo de reconstrucción 3D con desplazamientos perpendiculares al plano de luz**

El ángulo de inclinación que forman las cámaras con respecto al haz láser provoca distorsiones no uniformes en las imágenes tomadas por las cámaras. Por dicho motivo, es necesario realizar un sofisticado proceso de calibración para obtener unos resultados adecuados. Dicha calibración permite pasar de los desplazamientos dentro del plano de la imagen a los desplazamientos ocurridos en el plano objeto (real). Esta transformación geométrica corresponde a una homotecia.

Al realizar esta calibración hay que hacer corresponder las relaciones geométricas entre el desplazamiento real de la partícula  $\Delta x = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)$  con el desplazamiento proyectado  $\Delta S = (\Delta X_1, \Delta Y_1, \Delta X_2, \Delta Y_2)$  en el plano de la imagen grabada por cada cámaras. Estas relaciones geométricas pueden expresarse de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 \Delta X_1 &= a_1 \Delta x + a_2 \Delta z \\
 \Delta Y_1 &= a_3 \Delta y + a_4 \Delta z \\
 \Delta X_2 &= a_5 \Delta x + a_6 \Delta z \\
 \Delta Y_2 &= a_7 \Delta y + a_8 \Delta z
 \end{aligned}
 \tag{4.7}$$

Estas cuatro ecuaciones nos dan los tres desplazamientos reales de la partícula  $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$  y se han obtenido a partir de las relaciones geométricas entre el plano del láser y el de cada una de las cámaras. Al obtener cuatro ecuaciones para tres incógnitas, podemos emplear la ecuación sobrante para disminuir el error en los resultados.

#### 4.7 GENERALIDADES DEL LÁSER

La palabra “láser” es el acrónimo en inglés de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, Amplificador de Luz por Emisión Estimulada de Radiación en castellano

En PIV, los láseres son comúnmente utilizados dada su capacidad de emitir una luz muy intensa y de muy breve duración.

En esencia, todos los láseres están formados por tres partes fundamentales:

- Medio láser o medio activo: Gas atómico o molecular, semiconductor o material sólido.
- Fuente de bombeo: Que excita al medio láser a través de la introducción de energía electromagnética o química.
- Espejos: Que proporcionan una oscilación dentro del medio láser.

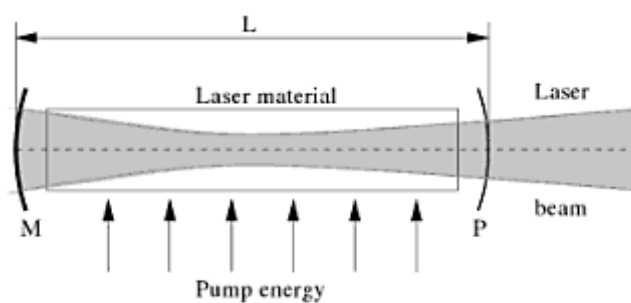


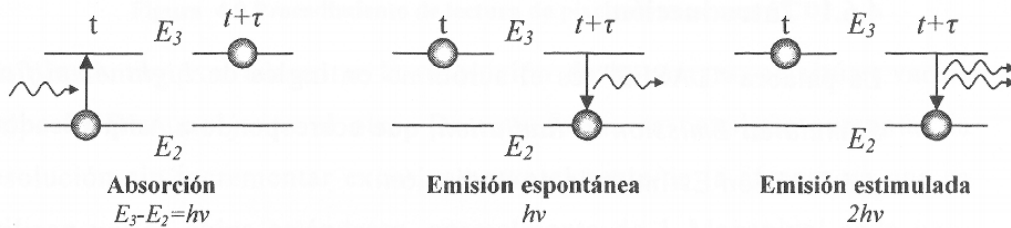
FIGURA 4.7: Esquema de un láser <sup>[11]</sup>

**4.7.1 FUNCIONAMIENTO BÁSICO**

Según el modelo clásico de Bohr, un átomo consiste en un núcleo con carga eléctrica positiva y una nube de electrones con carga negativa distribuidos en órbitas discretas con distintas energías asociadas a sus órbitas.

Un electrón puede absorber un fotón (cantidad discreta de energía) para pasar a una órbita superior de más energía. El proceso es reversible.

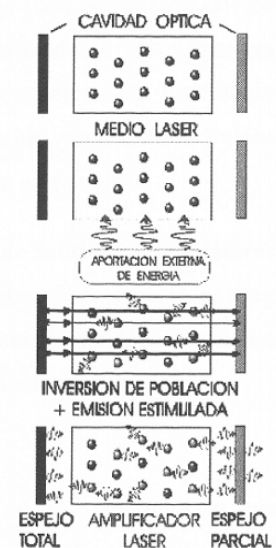
Como se muestra en la siguiente imagen, si a un átomo en estado (nivel de energía)  $E_2$  se le aplica una cantidad de energía ( $h\nu = E_3 - E_2$ ), éste pasa a estar en estado  $E_3$ . Se dice entonces que el electrón ha pasado a un estado excitado, aunque sólo se puede mantener en él durante un tiempo muy breve ya que este estado suele ser poco estable. Al caer de nuevo a su órbita previa, emite un nuevo fotón, lo que se conoce como emisión espontánea.



**FIGURA 4.8: Interacciones elementales entre átomo y radiación electromagnética** [17]

En ocasiones, si a este átomo excitado se le aplica la misma cantidad de energía  $h\nu$ , éste tiende a desexcitarse hacia  $E_2$  justo cuando pasa un fotón  $h\nu$  emitiendo a su vez otro fotón idéntico en tres propiedades: longitud de onda, fase (coherencia temporal) y dirección (coherencia espacial). A este proceso se le llama emisión estimulada.

La luz, radiación electromagnética correspondiente a la porción óptica del espectro electromagnético, es generada en un medio láser y amplificada hasta niveles muy altos de energía mediante el proceso de bombeo óptico.



Lo usual es que el cristal tenga más electrones en sus estados fundamentales, siendo el proceso predominante entonces el de la simple absorción. No obstante, si se consigue que hubiera más electrones en su estado excitado que en el fundamental, es posible obtener una amplificación de la luz obtenida: es el proceso de inversión de población.

Para obtener esto se utiliza el llamado bombeo óptico, consistente en una cavidad óptica formada por dos espejos de alta reflexibilidad, uno totalmente reflector y el otro parcialmente reflector y parcialmente transmisor, que generaría un mecanismo de retroalimentación de fotones. Con esto y con el mantenimiento del estado de inversión de población mediante la aportación continuada de energía externa, se produce la amplificación de la emisión estimulada de energía radiante (luz láser).

Existen diferentes tipos de láser comúnmente utilizados en los estudios de PIV como son Helio-Neón, Vapor de cobre, Argón-ión, semiconductor, Rubí, etc. respecto a los continuos y Neodimio-YAG (el cual se describirá a continuación) respecto a los pulsados.

#### **4.7.2 LÁSER PULSADO DE NEODIMIO-YAG**

Es el láser de estado sólido más importante utilizado en estudios con PIV. En estos láseres el medio activo es un cristal. La forma del medio activo consiste normalmente en una barra cilíndrica o rectangular. El medio activo es excitado a través de su superficie a lo largo de la barra, mientras que el haz láser obtenido se emite por los extremos de la barra, que normalmente están en ángulo recto con la barra y son pulidos ópticamente. La fuente de bombeo en los láseres pulsados se realiza con lámparas de Xenón o Kriptón.

El cristal de YAG (Ytrio-Aluminio-Granate) se utiliza para obtener pulsos de alta repetitividad. Además, su alta conductividad térmica permite disipar más fácilmente el calor generado. En la siguiente figura se muestra un esquema de un láser de Nd-YAG, en la que pueden observarse cuatro niveles de energía. Los iones de Neodimio tienen dos bandas de absorción, y la excitación se puede efectuar por bombeo óptico.

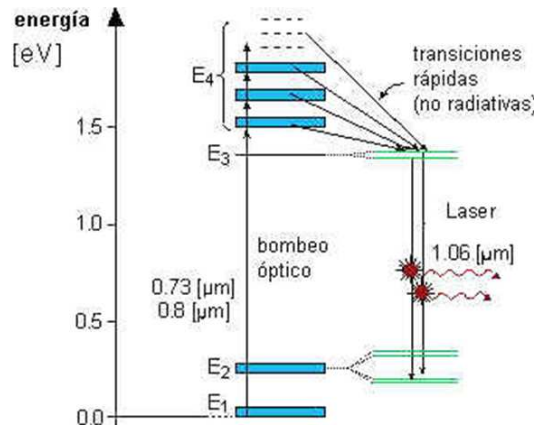


FIGURA 4.9: Diagrama de energías en un láser Nd-YAG <sup>[17]</sup>

Desde los niveles excitados, los iones de Neodimio son transferidos a un nivel inferior mediante transiciones no radiativas. La emisión estimulada tiene lugar desde estos niveles a otros inferiores, emitiendo fotones a una longitud de onda de 1.064 micrómetros.

Todos los láser de Nd:YAG tienen una obturación Q denominada Q-switch que consiste en un cristal electro-óptico intra-cavidad que almacena energía dentro del medio láser haciendo que los espejos sean totalmente reflectores durante un periodo de tiempo establecido, produciendo pulsos con una frecuencia determinada a voluntad, y de alta energía.

El precio que hay que pagar por la alta potencia de salida de estos láseres es que el perfil de la emisión tiende a ser pobre. Este aspecto es muy importante para las mediciones en el PIV ya que dicho perfil debe ser bueno no sólo en las cercanías al láser sino en su zona media y lejana.

El paso de 1064 micrómetros a los 532 micrómetros propios de la luz verde se realiza a través de un cristal doblador de frecuencia.

### **4.7.3 SEGURIDAD EN LA UTILIZACIÓN DE LÁSERES**

La gran variedad de láseres que se fabrican en la actualidad, y sus diferentes características de emisión en función del tipo de aplicación, hace en ocasiones difícil identificar la existencia de un potencial riesgo laboral y la adopción de las medidas preventivas más apropiadas.

Por dicho motivo, en la norma CE1-825-1984 se agrupan los láseres en cuatro clases generales ya que los riesgos que se derivan de su uso varían notablemente en función de la clase a la que pertenezcan. Ello es debido a los amplios intervalos posibles para la longitud de onda, potencia o energía y las características de emisión continua o de impulsos de un haz láser.

El láser empleado en el laboratorio fue de Clase IV, que engloba los láseres de mayor potencia. En esta clase, los láseres visibles e IR-A pueden producir reflexiones difusas peligrosas; pueden causar lesiones en la piel y constituir peligro de incendio por lo que su uso requiere una precaución extrema. Por ello, los riesgos a tener en cuenta durante la utilización de láseres de Clase IV en el estudio de condiciones de combustión son los siguientes:

#### **– RIESGOS OCULARES**

Los riesgos oculares son los más comunes, al ser los ojos los órganos más sensibles a los efectos del láser. El daño puede producirse de forma directa o por reflexión en alguna superficie reflectiva.

A la hora de definir dichos riesgos y de elegir un protector ocular, se ponen en juego factores como la potencia o energía del sistema, el límite máximo permisible a la exposición según el láser a utilizar, la duración y frecuencia de los pulsos, la necesidad de usar múltiples longitudes de onda, etc. Pero sin duda, la densidad óptica y la longitud de onda del haz láser son los factores que juegan el rol más importante.

La densidad óptica es el parámetro que indica el mínimo nivel de atenuación necesaria para disminuir la exposición del ojo al rayo a niveles seguros. Los filtros de la protección ocular son específicos de acuerdo a sus densidades ópticas y éstas se determinan teniendo en cuenta la longitud de onda, la energía y el diámetro del rayo, lo que implica que se ha de usar una protección ocular determinada para cada tipo de láser en función de estos parámetros.

Los filtros del protector no deben tener defectos que puedan alterar su función protectora (rayas, agujeros, burbujas, degradación), por lo que deben ser higienizados e inspeccionados minuciosamente periódicamente.

Es además esencial asegurar la certificación de los protectores, para asegurar así una mínima garantía de calidad.

#### – RIESGOS CUTÁNEOS

La piel es considerada menos vulnerable que los ojos a efectos de la radiación láser. Los daños en la misma pueden ocurrir por un mecanismo de daño térmico o fotoquímico. Estos últimos predominan en la zona del espectro electromagnético ultravioleta, pudiendo producir lo que se conoce comúnmente como quemadura solar.

La exposición a radiación UV también se asocia con un aumento del riesgo de desarrollar cáncer y envejecimiento prematuro de la piel. Las quemaduras térmicas en la piel son raras ya que generalmente requieren exposiciones de un alto nivel de energía durante un tiempo prolongado.

#### – RIESGOS AMBIENTALES

Los riesgos ambientales se deben al posible daño que se puede producir en el sistema respiratorio debido a la inhalación de productos liberados como resultado de la acción de tóxicos producidos por la combustión de materiales inflamables.



– RIESGOS POR COMBUSTIÓN

Los riesgos por combustión son causados por la exposición de materiales inflamables al rayo láser, que pueden ser fácilmente encendidos o pueden liberar tóxicos al producirse su combustión.

– RIESGOS ELÉCTRICOS

Los riesgos eléctricos son debidos a que los láseres pertenecientes a la categoría IV usan generalmente muy alta corriente y fuentes de energía de alto voltaje, lo que implica ciertos riesgos de electrocución.

El uso de láseres puede llegar a presentar peligro de shock eléctrico, a los que se puede estar expuesto tanto durante la instalación, servicio o mantenimiento de la unidad. Por eso, este tipo de maniobras debe ser realizado por personal cualificado, y los usuarios del láser no deben intentar reparar o extraer los paneles de seguridad de la unidad.

Otro riesgo se da particularmente debido al sistema de refrigeración de los componente eléctricos de alto voltaje, ya que suelen estar localizados cerca de bombas de agua para su refrigeración, por lo que en el caso de un derrame o una ruptura de una manguera puede ocurrir una situación peligrosa.

Antes de pasar a la manipulación de los equipos, es necesario aprobar una prueba sobre conocimientos de los riesgos del láser, formas de evitarlos y modo de actuar ante cualquier incidencia que será evaluada por un responsable del laboratorio.

#### **4.7.4 METODOLOGÍA EN LA UTILIZACIÓN DEL LÁSER**

En primer término, y antes siquiera de comenzar con el encendido del sistema de alimentación del láser, se ha de señalar en la entrada al laboratorio la utilización en el mismo de equipos láser de gran peligrosidad mediante señales luminosas y carteles de advertencia.

Además, es necesario aislar el laboratorio en cuanto a las posibles fugas del haz láser fuera del mismo, lo que hace necesario tapar las ventanas y posibles puntos de fuga.

Para evitar posibles reflexiones del haz láser en objetos metálicos, es necesario que todo el personal presente en la zona de utilización del láser se desprenda de todos aquellos objetos metálicos tales como relojes, pulseras, collares o anillos.

Por último, cabe destacar la exigencia del uso de protección ocular (gafas homologadas para el tipo de láser utilizado) durante todo el tiempo que se trabaje con el láser, ya que, como se comentó anteriormente, la no utilización de este tipo de protección puede ocasionar daños oculares irreversibles en el personal del laboratorio.

#### **4.8 *ELECCIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE SEMBRADO***

Como ya se mencionó, la técnica PIV se basa en la indispensable presencia de partículas trazadoras en el fluido como medio para estimar su velocidad. Recordemos que estos sistemas realmente no miden la propia velocidad del fluido, que parece lo más riguroso, sino la velocidad de las partículas que transporta el fluido en su seno. En la mayoría de aplicaciones, el sembrado será introducido y generado de forma artificial para asegurarse que cumpla ciertos requisitos indispensables para que la velocidad de las partículas sea lo más parecida posible a la del fluido y para posibilitar su posterior detección. El requisito principal que han de cumplir las partículas elegidas será que éstas sigan en su movimiento cualquier fluctuación o turbulencia del fluido.

Para una determinada potencia del láser y apertura de la cámara, ésta tiene que ser capaz de obtener niveles de señal a ruido a la salida del módulo fotodetector lo suficientemente grandes para minimizar el error de estimación de la velocidad. De hecho, el algoritmo que estima la velocidad es muy sensible al nivel de señal de ruido.

Además, otro factor a tener muy en cuenta es el número de partículas detectadas, que tiene que ser suficiente para que la resolución espacial, relacionada con la concentración de partículas y con el tamaño de la zona medida, sea adecuada.

Para que la partícula siga bien fluido, ésta ha de cumplir con el requisito de que la fuerza a la que se ve sometida por acción del fluido  $F_D$  sea mucho mayor que su inercia  $F_I$ .

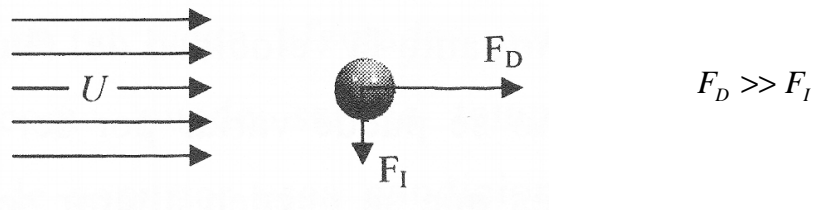


FIGURA 4.10: Diagrama de fuerzas sobre una partícula trazadora <sup>[17]</sup>

Conocida la expresión de la fuerza de inercia de la partícula:

$$F_I = m \cdot a = \rho_p \cdot V \cdot a = \rho_p \cdot \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot D^3 \cdot a \approx \rho_p \cdot a \cdot D^3 \quad (4.7)$$

Siendo  $m$  la masa de las partículas,  $a$  su aceleración,  $\rho_p$  su densidad,  $V$  su volumen y  $D$  su diámetro.

Y teniendo en cuenta que el coeficiente de arrastre ( $C_D$ ) para un flujo laminar se puede aproximar con la siguiente ecuación:

$$C_D = \frac{24}{Re_D} = \frac{24 \cdot \nu}{v \cdot D} \quad (4.8)$$

Siendo  $Re_D$  el número de Reynolds basado en el diámetro,  $\nu$  la velocidad de la partícula y  $v$  la viscosidad cinemática.

Así obtenemos la fuerza de resistencia de una partícula esférica inmersa en un fluido en movimiento:

$$F_D = C_D \cdot A_f \cdot \rho_f \cdot \frac{v^2}{2} = \frac{24 \cdot v}{v \cdot D} \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 \cdot \rho_f \cdot \frac{v^2}{2} = 3 \cdot \pi \cdot v \cdot v \cdot D \cdot \rho_f \approx v \cdot v \cdot D \cdot \rho_f \quad (4.9)$$

Siendo  $A_f$  el área frontal de la partícula.

Teniendo en cuenta el diámetro de las partículas ( $D < 1 \mu\text{m}$ ) y las velocidades contempladas ( $v < 100 \text{m/s}$ ), el flujo alrededor de las partículas se puede considerar siempre laminar ( $\text{Re} = vD/\nu < 20$ ).

Obtenemos así que, según la ecuación anterior  $F_D \gg F_I$ ,  $F_D$  ha de ser mucho mayor a  $F_I$ , por lo que el cociente entre ambos será mucho mayor a uno:

$$\frac{F_D}{F_I} \gg 1 \rightarrow \frac{v \cdot v \cdot D \cdot \rho_f}{\rho_p \cdot a \cdot D^3} \gg 1 \rightarrow \frac{v \cdot v \cdot \rho_f}{\rho_p \cdot a \cdot D^2} \gg 1 \quad (4.10)$$

De este cociente, como tanto la velocidad del fluido como su viscosidad cinemática no se pueden variar por ser propias del fluido en estudio, los únicos valores que se pueden alterar son el diámetro de las partículas y su densidad.

Otro aspecto importante y que se ve reflejado en la ecuación anterior es la aceleración  $a$  al que está sometida la partícula. Para un tamaño y densidad determinado de partículas, existe una aceleración límite a la que pueden responder adecuadamente. Esta característica es muy importante en el estudio de flujos turbulentos, ya que se producen cambios en la velocidad del fluido.

Observando los diferentes requisitos a cumplir, podemos ver que por una parte necesitamos tamaños pequeños de partículas para un buen seguimiento del fluido, y por otra que los tamaños sean lo suficientemente grandes como para que la luz dispersada sea lo suficientemente intensa como para ser detectada y registrada por los sensores CCD de las cámaras. Por tanto, aparece una situación de compromiso que debe ser resuelta para cada caso particular. Sin embargo, si la luz es lo suficientemente potente, este segundo requisito cobra menor importancia, de ahí la utilización de fuentes láseres (muy potentes) como emisores de luz.

Además de estos aspectos, las partículas han de cumplir ciertas propiedades en función del tipo de experimento a realizar:

- Toxicidad de las partículas: Además de las características típicas de las partículas presentadas, han de considerarse los aspectos de seguridad y respeto al medioambiente. Existen distintos tipos de sembrados que cumplen con los requisitos de ser buenos dispersores y buenos seguidores del flujo. Pero a veces, estas sustancias pueden producir efectos nocivos. Hay que tener siempre en cuenta que las partículas pueden ser inhaladas por el usuario u operador del sistema, pudiendo provocar efectos nocivos en el cuerpo humano.
- Temperatura: Otra característica importante es que las partículas no se vean afectadas por las condiciones del experimento, como puede ser la temperatura.. La partícula elegida habrá de soportar esas condiciones en todo momento, sobre todo en la medida de llamas o fluidos a muy alta temperatura.

En función de todas estas consideraciones, las partículas trazadoras utilizadas en los experimentos realizados en el laboratorio son partículas sólidas de  $\text{TiO}_2$  con un diámetro de 0,3 micrómetros para el flujo interno y una disolución de Propilenglicol y agua para el flujo externo de la que generamos partículas de 1 micrómetro de diámetro gracias a un sembrador tipo Laskin.

## *CAPÍTULO 5*

# INSTALACIONES DE LABORATORIO

### Índice general

---

5.1	DESCRIPCIÓN DEL QUEMADOR .....	59
5.2	DESCRIPCIÓN DEL LÁSER Y LA ÓPTICA.....	62
5.3	CALIBRACIÓN DEL SISTEMA DE MEDIDA.....	64
5.4	DISPOSICIÓN DE LAS CÁMARAS.....	68
5.5	SEMBRADO .....	69
5.6	ESQUEMA DE LA INSTALACIÓN .....	72

---

Se explicarán en este apartado las instalaciones experimentales utilizadas en el laboratorio situado en la planta baja del área de Ingeniería Térmica y de Fluidos del edificio Betancourt de la Universidad Carlos III de Madrid, donde se encuentran el quemador de gas estabilizado por giro, el láser y los equipos informáticos utilizados.

Debido a la peligrosidad del láser, se sellan todas las ventanas con material opaco para evitar salidas del de luz láser al exterior. Cuando el láser está funcionando, se indica su utilización mediante una luz roja de peligro situada en lo alto de la puerta exterior. La puerta de entrada lleva un cartel avisando sobre los peligros de la radiación láser por más seguridad, informando sobre la necesidad de tener formación sobre manipulación de láser para poder tener acceso al laboratorio.

Por otro lado, se evita en lo posible corrientes de aire en el interior del laboratorio para minimizar perturbaciones en las medidas realizadas. Además, es necesario recalibrar los aparatos de medida en numerosas ocasiones debido a las grandes variaciones que provocan pequeñas perturbaciones en el ambiente tales como cambios de temperatura, presión y humedad atmosférica además de posibles movimientos involuntarios de las cámaras o del quemador.

## **5.1 DESCRIPCIÓN DEL QUEMADOR**

El quemador utilizado es capaz de generar un campo fluido con giro para estabilizar la llama en una zona de recirculación o de baja velocidad, según su modo de operación. Además, es importante que sea capaz de generar un amplio rango de números de swirl (entre 0,4 y 1,5) con objeto de estudiar el comportamiento del flujo en condiciones diferentes. Además, se trata de un quemador con una geometría sencilla, lo cual simplifica el mallado del mismo para facilitar posibles comparaciones con simulaciones numéricas.

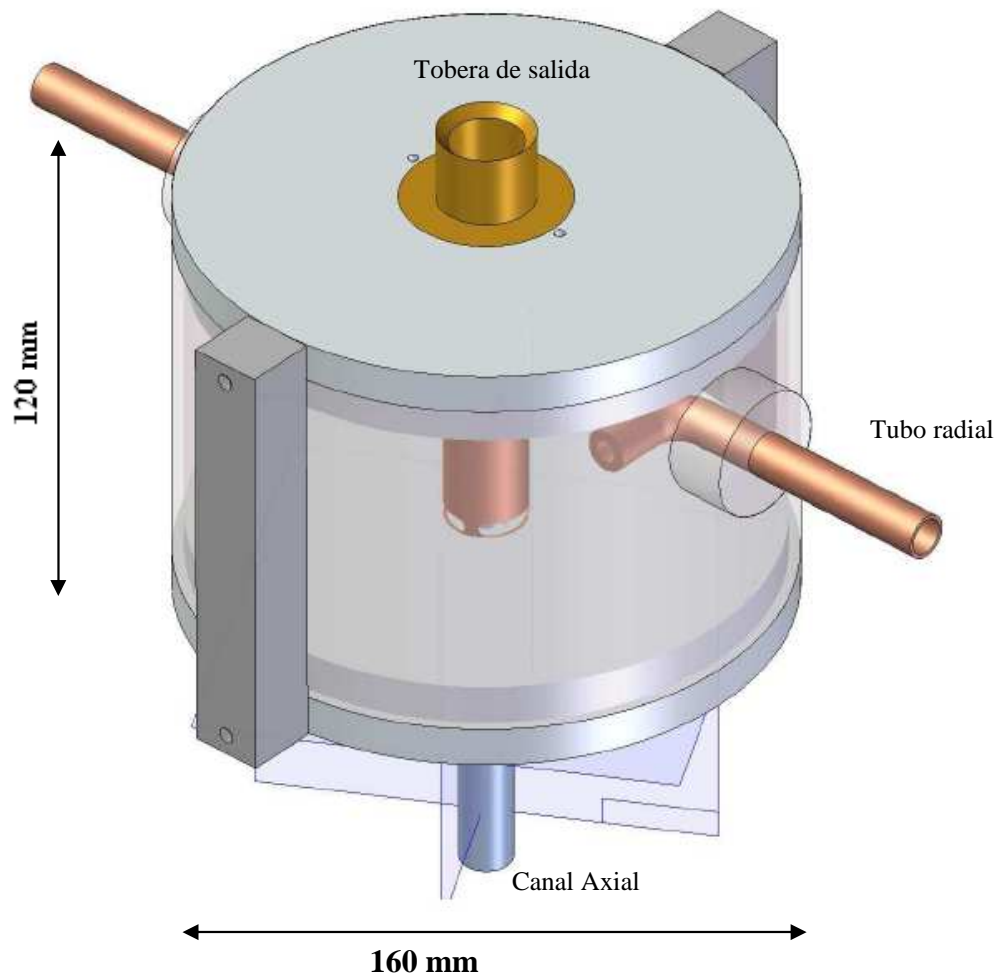


FIGURA 5.1: Diseño 3D del quemador empleado <sup>[9]</sup>

La figura 5.1 muestra una representación tridimensional del quemador. El giro se genera a través de dos tubos que entran en la cámara de forma radial y que acaban con dos codos de 90°. Este flujo, que lleva momento angular, entra por un pasaje anular para emerger en una tobera antes de salir al ambiente. En el centro del pasaje anular, existe un canal axial que canaliza la mezcla desde la base de la cámara hacia la tobera., cuyo flujo interior no lleva componente tangencial. El flujo con giro se introduce en el conducto central a través de unos orificios realizados en el conducto central como se muestra en la figura 5.2.



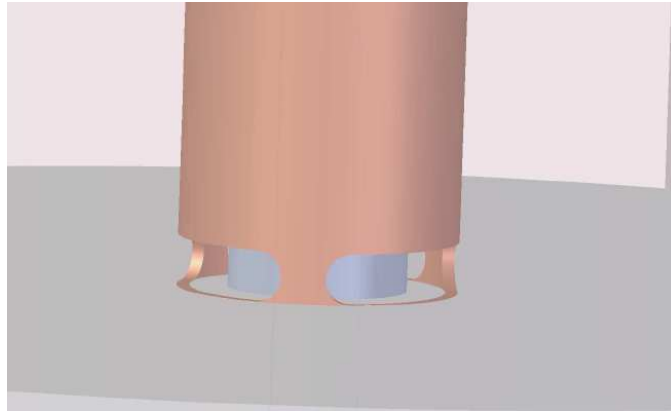


FIGURA 5.2: Detalle de la entrada del flujo tangencial al conducto central <sup>[9]</sup>

El flujo anular con giro introducido en el conducto central se une más adelante al flujo axial sin giro introducido a través del tubo concéntrico al anterior.

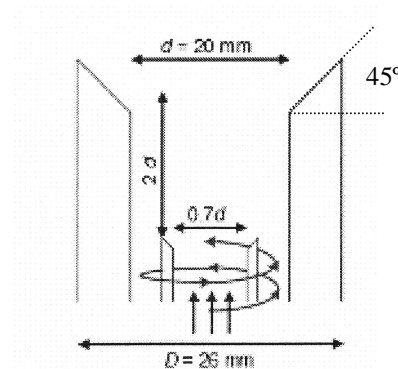


FIGURA 5.3: Esquema de la tobera

La tobera utilizada tiene un semi-ángulo de apertura de  $45^\circ$  y una altura de 3cm sobre la superficie del quemador, lo cual permite la ingestión de aire en el borde de la tobera, evitando que la llama se adhiera a la superficie. La mezcla entrando por las entradas tangenciales permite imprimir giro a la corriente. Por otro lado, el flujo axial introducido a través del centro del tubo interno permite “levantar” la llama y conseguir estabilizarla a cierta altura de la tobera, y no dentro de la misma. Esto es muy importante para la caracterización del flujo mediante PIV, ya que permite cumplir con el criterio de acceso óptico a la zona de interés para este proyecto (la recirculación).

Al variar la relación de gastos que pasa por las entradas tangenciales y axiales, se consigue modular el número de Swirl resultante de forma sencilla y efectiva.

La entrada de aire axial se controla mediante una válvula de aguja con un máximo de 22 vueltas completas y el flujo tangencial mediante dos controladores de gasto másico digitales pilotados por ordenador en el que se introduce el gasto deseado, o bien a través del Reynolds basado en el diámetro exterior de la tobera de salida, o bien a través del caudal de aire. Un software específicamente desarrollado para ello se encarga de pilotar los controladores de gasto másico

Las entradas tangenciales son regulables en cuanto a su radio de entrada en la cámara de vientos, lo que permite variar el swirl generado en el anillo exterior de la cámara; por su parte, el swirl global se regula variando la relación de flujo en el anillo y en el tubo axial.

Es de especial importancia la correcta alineación de los dos tubos concéntricos, para asegurar unas condiciones de simetría lo más precisas posibles. Por lo que antes de realizar medidas se trata de corregir posibles errores de alineación con una pieza de calibración que se introduce entre los tubos asegurando una tolerancia de alineación del orden de 0.1 mm.

## **5.2 DESCRIPCIÓN DEL LÁSER Y LA ÓPTICA**

La técnica de PIV requiere la formación de una hoja de luz láser con objeto de iluminar una determinada zona del flujo estudio (con su correspondiente sembrado) para poder tomar imágenes con cámaras CCD.

El láser utilizado es del tipo Nd:Yag “Brilliant” de doble pulso de Quantel que proporciona pulsos de alta energía (400mJ) con una longitud de onda de 532 nm a intervalos de tiempo  $\Delta t$  desde 1.3  $\mu s$  hasta 125 ms con una frecuencia de 10 Hz. Para la formación del plano de iluminación se coloca a la salida del láser, donde el haz sale colimado, una óptica de formación de plano compuesta por un juego de lentes esféricas permitiendo ajustar la anchura (enfoque) del plano y una lente cilíndrica divergente que determinan el ángulo de apertura del haz (con focales respectivas de -20mm y -10 mm). Esta hoja de luz tiene un perfil de 1,41 mm.<sup>[9]</sup>

Con objeto de evitar reflexiones en la tobera, esta se recubrió con un material oscuro poroso (baja reflectividad), así como todas las superficies del quemador susceptibles de reflexión. Además, se colocó una trampa de luz (equivalente a un cuerpo negro) detrás del quemador, en la dirección de propagación del láser con objeto de asimilar toda la radiación láser restante tras la iluminación del flujo.

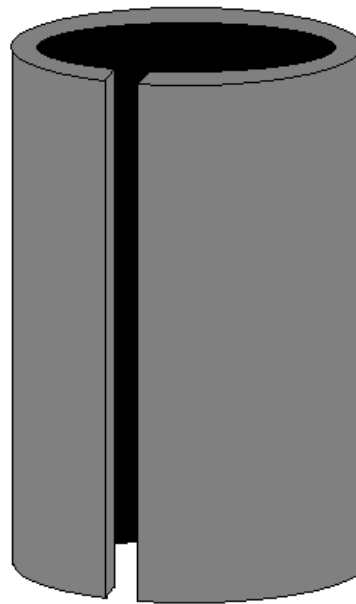


FIGURA 5.4: Representación trampa de luz

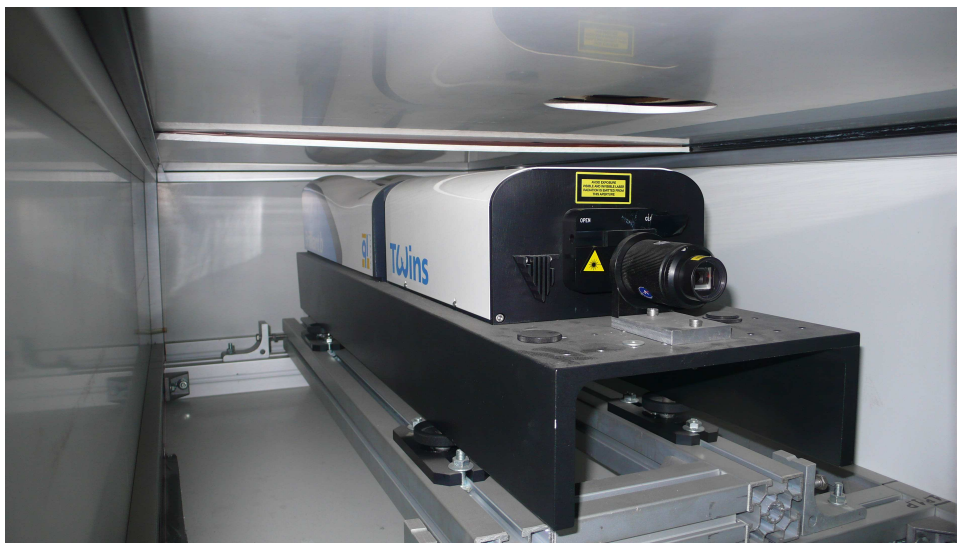


FIGURA 5.5: Láser Nd: Yag

### 5.3 CALIBRACIÓN DEL SISTEMA DE MEDIDA

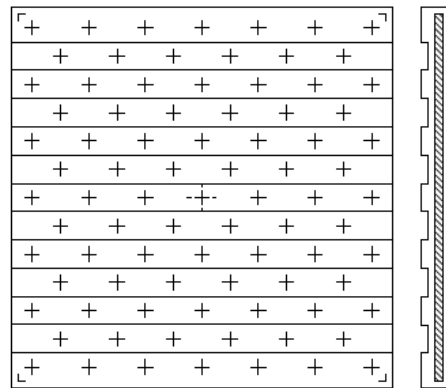
El flujo que se quiere estudiar presenta una estructura general muy compleja (flujo con giro, recirculación interna, torbellinos relativamente intensos). Dado que el flujo es altamente tridimensional, principalmente por el efecto del giro, se necesita de una técnica capaz de medir las tres componentes de la velocidad, al menos en un plano. La técnica de estéreo-PIV consiste en reproducir una visión estereoscópica (desde dos puntos de vista) para así percibir el desplazamiento perpendicular al plano de iluminación. El espesor del plano ha de ser suficiente para limitar la pérdida de partículas trazadoras del flujo al desplazarse en la dirección perpendicular al plano.

En configuración estereoscópica, la disposición binocular de las cámaras introduce una distorsión de la imagen por lo que es necesario realizar un proceso de calibración que sea capaz de medir los desplazamientos reales de las partículas en función de los registrados por las cámaras (deformadas por el ángulo de visión). Así, la posición de las partículas de una cámara tiene correspondencia en la otra, con lo que es posible la reconstrucción de la tercera dimensión.

#### 5.3.1 MODELO DE PIN-HOLE

La idea de la calibración es poner un objeto de referencia para poder hallar la función de “distorsión” entre el plano objeto y el plano de la imagen. El modelo del pinhole asume que todos los “rayos” de luz pasan por el mismo punto (casi asimilable al diaphragma de la cámara). Como se conoce el objeto de referencia, la calibración consiste en ajustar por mínimos cuadrados una serie de parámetros físicos (internos a la cámara: focal, etc... y externos: ángulo de visión, distancia al objeto, etc...)

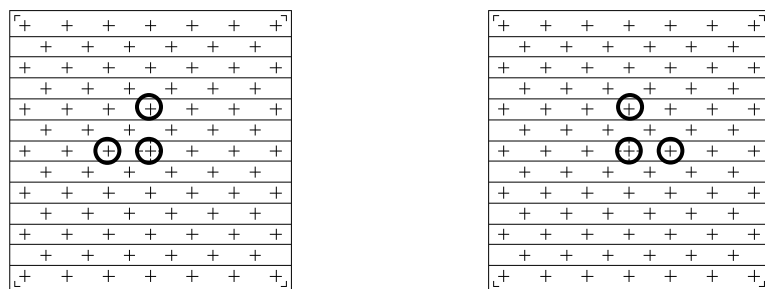
El denominado modelo del pin-hole consiste en la utilización de blanco de calibración una regleta tridimensional de dos niveles de profundidad marcadas con puntos blancos sobre un fondo oscuro para la calibración de las cámaras. Con este aparato, se consiguen establecer las posiciones exactas de dichos puntos en el espacio a partir de cada punto de la imagen tomada por la cámara.



**FIGURA 5.6: Regleta de calibración <sup>[3]</sup>**

En primer lugar, se establece en el software el tipo de blanco de calibración utilizado y se define uno de los planos de la claqueta como plano de referencia, es decir, de profundidad nula. Los puntos que no estén en ese plano de referencia aparecerán movidos en las imágenes corregidas por la calibración; esta desviación establece la profundidad de la imagen.

Para definir este plano de referencia, el programa pide la localización de tres puntos contiguos en ella. Hay que tener en cuenta que el software nos demanda la selección de tres puntos, los cuales han de ser los mismos para las dos cámaras, es decir, que si elegimos un punto a la izquierda del central para la cámara 1, este mismo punto estará a la derecha del central en la cámara 2, debido a la disposición contrapuesta de las cámaras.



**Cámara 1**

**Cámara 2**

**FIGURA 5.7: Elección de puntos**

Una vez que el programa identifica estos tres puntos que ya conoce de antemano, es capaz de determinar la posición del resto de puntos del blanco de calibración.

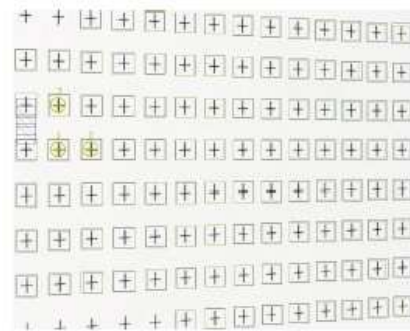


FIGURA 5.8: Identificación de puntos <sup>[3]</sup>

Por otro lado, el ángulo de vista que tienen las cámaras en estéreo PIV provoca que las cámaras no consigan un enfoque adecuado en la totalidad de la imagen. Para contrarrestar este efecto, las cámaras disponen de un dispositivo denominado “Scheimpflug”, que consiste en alinear el plano imagen (chip CCD), el plano de la lente y el plano objeto (blanco de calibración). Esto se consigue sencillamente girando el objetivo de la cámara.

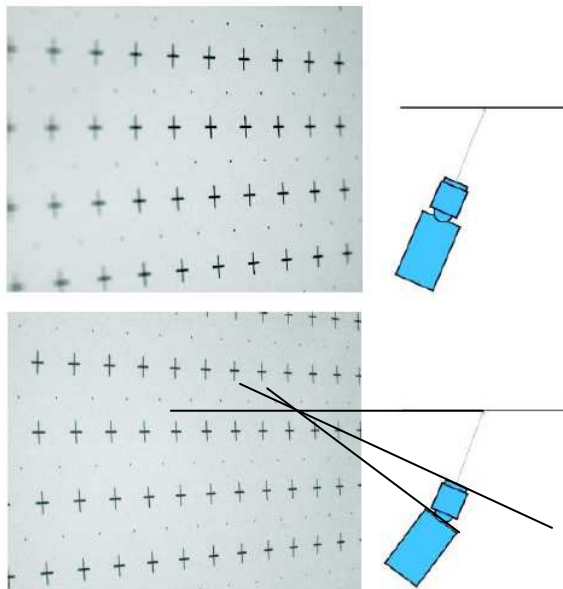


FIGURA 5.9: Efecto de el sistema Scheimpflug <sup>[3]</sup>

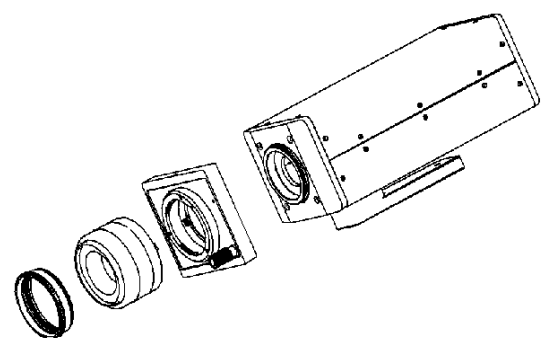


FIGURA 5.10: Dispositivo Scheimpflug <sup>[3]</sup>

Esta inclinación de las cámaras provoca a su vez una distorsión en la imagen que también se tiene en cuenta durante el proceso de calibración. Además, se debe tener en cuenta que los vectores de velocidad solo se pueden calcular para el área de visión coincidente entre las imágenes obtenidas por las dos cámaras. Por ello se ha de tener cuidado en optimizar la zona de visión común de las dos cámaras.

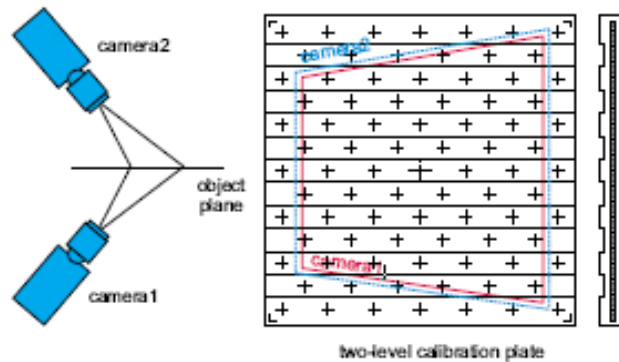


FIGURA 5.11: Ejemplo de imagen obtenida por cada cámara [3]

El programa compara dos imágenes hechas en un mismo instante de tiempo, una de cada cámara, solapando estas dos imágenes, ya que la posición de las partículas ha de ser la misma. Si esto no ocurre, el software corrige los parámetros de calibración para que la correlación entre las dos imágenes sea lo más adecuada posible.

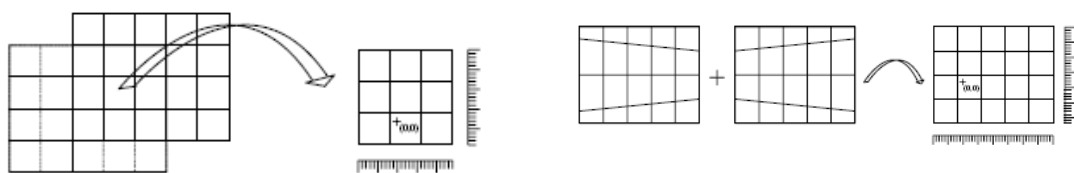


FIGURA 5.12: Solape de imágenes [3]

#### 5.4 DISPOSICIÓN DE LAS CÁMARAS

Las cámaras utilizadas tienen objetivos NIKON de alta calidad con distancia focal de 500 mm. Los objetivos están recubiertos de un filtro ultravioleta anti-reflexión y de un filtro interferencial que tiene un alto coeficiente de transmisión de entorno a 532 nm (longitud de onda de la luz emitida por el láser y dispersada por las partículas trazadoras). Para la obtención de las imágenes adecuadas, se han de tener muy en cuenta una serie de ángulos que se describen a continuación:

- Ángulo de  $35^\circ$  respecto a la perpendicular al plano de iluminación, para así optimizar la reconstrucción estereoscópica para la obtención de la tercera componente de la velocidad ( $45^\circ$  sería el óptimo), minimizando a la vez el error de distorsión introducido por el ángulo de vista y las aberraciones esféricas de las lentes trabajando en tales condiciones (este error crece con el ángulo de vista, volviéndose importante más allá de  $40^\circ$ ).
- Ángulo de  $18^\circ$  respecto al plano de salida de la tobera para que el lado inferior del campo de vista sea paralelo a la boquilla del quemador. Así se consigue que las cámaras no reciban luz dispersada por el interior de la tobera, pudiendo así obtener medidas muy cerca de la boquilla.

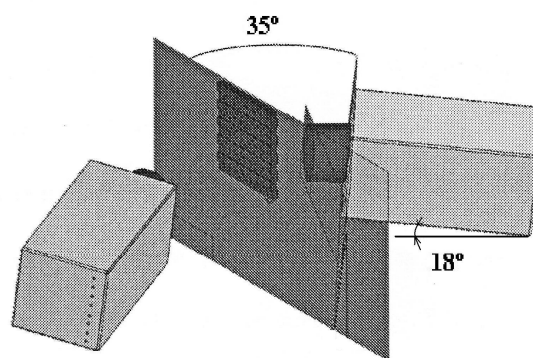


FIGURA 5.13: Disposición de las cámaras



El procesado de las imágenes de estéreo-PIV se realizó empleando el software comercial DAVIS 7.0 de LAVISION, con algoritmo multigríd y distorsión de la imagen y un tamaño final de la ventana de interrogación de 32 píxeles. Con una magnificación de las cámaras de unos 40  $\mu\text{m}/\text{píxel}$ , este procesado tiene una resolución espacial de aproximadamente 1.3 mm.

## **5.5 SEMBRADO**

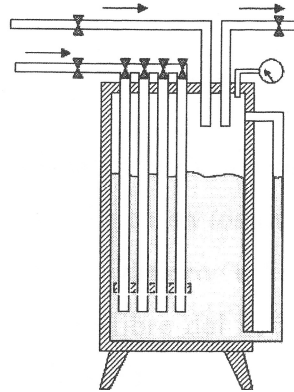
Se han utilizado dos sembradores distintos, un sembrador Laskin para el sembrado externo y un sembrador tipo Cyclón para el conjunto de flujos que se introducen en el quemador.

### **5.5.1 SEMBRADOR LASKIN**

La generación del sembrado a partir de líquidos consiste en evaporar este líquido para después condensarlo en los llamados generadores de condensación o bien inyectar el líquido directamente mediante atomizadores. Los atomizadores también pueden usarse para dispersar las partículas sólidas en líquidos evaporados, o para generar diminutas gotas de líquidos de alta presión (aceites) que han sido mezcladas con líquidos de baja presión de vapor (alcoholes).

Los sistemas de sembrado más comúnmente utilizados en túneles de viento para la visualización del flujo son los generadores de humo y las partículas de poliestireno o látex, las cuales son inyectadas con una mezcla de agua y etanol.

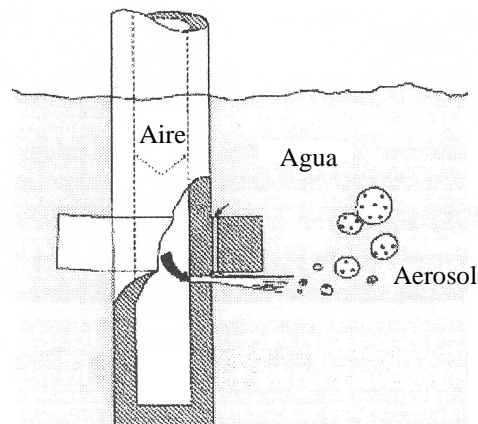
En el caso de estudios de PIV se emplean, en la mayoría de los casos, agua como material para inyectar y unos inyectores denominados Laskin. Las partículas así obtenidas ofrecen las ventajas de permanecer en el aire todo el tiempo de estudio, tener una alta presión de vapor (lo que evita que las partículas se evaporen durante la realización de las mediciones) y no cambiar su tamaño significativamente bajo variaciones de las condiciones.



**FIGURA 5.14: Diagrama de un sembrador Laskin**

El generador de aerosol consiste en un cilindro cerrado con dos entradas de aire y una de salida para la mezcla. En la parte superior se introducen cuatro conductos sumergiendo sus extremos dentro del agua situada en el interior del contenedor, cada uno de los cuales conectado a su correspondiente válvula y a una de las entradas de aire en un extremo y cerrados en el otro extremo; el aire sale a través de pequeños orificios de 1mm de diámetro perforados a lo largo del final del conducto.

En algunos casos se coloca, sobre el comienzo de los orificios, un anillo llamado impactor, dejando un hueco de 1 mm por cada lado entre éste y el tubo. La función de el impactor es la de crear una inyección de fluido en el aire que sale de los orificios debido a la depresión que se genera en los huecos existentes entre el impactor y el tubo. Esta configuración mejora en cierto grado el sembrado, pero la complejidad de su fabricación no compensa su uso en instalaciones de laboratorio convencionales.



**FIGURA 5.15: Inyector con impactor**

El aire comprimido con una diferencia de presión respecto a la salida de entre 0,5 y 1,5 bares se introduce en los inyectores Laskin, lo que genera burbujas dentro del líquido. Estas burbujas contienen pequeñas gotas de agua que son liberadas cuando las burbujas ascienden hasta la superficie libre del agua donde se rompen.

El tamaño de las partículas generadas depende sobre todo del tipo de líquido que está siendo pulverizado, pero también de la presión a la que trabajan los inyectores utilizados.

Para la difusión del sembrado, se utilizó un difusor circular de gas butano como el mostrado en la figura 5.5.



**FIGURA 5.16: Fotografía del difusor utilizado**

### **5.5.2 SEMBRADOR CICLÓN**

Los sembradores tipo ciclón basan su funcionamiento en la separación de partículas gracias a fuerzas de inercia.

En el fondo del depósito se dispone de partículas de  $\text{TiO}_2$  de diferentes diámetros. El objetivo es separar aquellas partículas con el menor diámetro, en este caso de entorno a 1 mm. Para conseguirlo, introducimos aire por dos entradas radiales que

finalizan en codos contrapuestos, lo que genera un ciclón o remolino en el interior del depósito. Por fuerza centrífuga, las partículas más pesadas y grandes se dirigen hacia las paredes del depósito, mientras que aquellas de menores diámetros permanecen en el centro del ciclón, las cuales se extraen del dispositivo por un conducto que las dirige hacia la cámara de combustión.

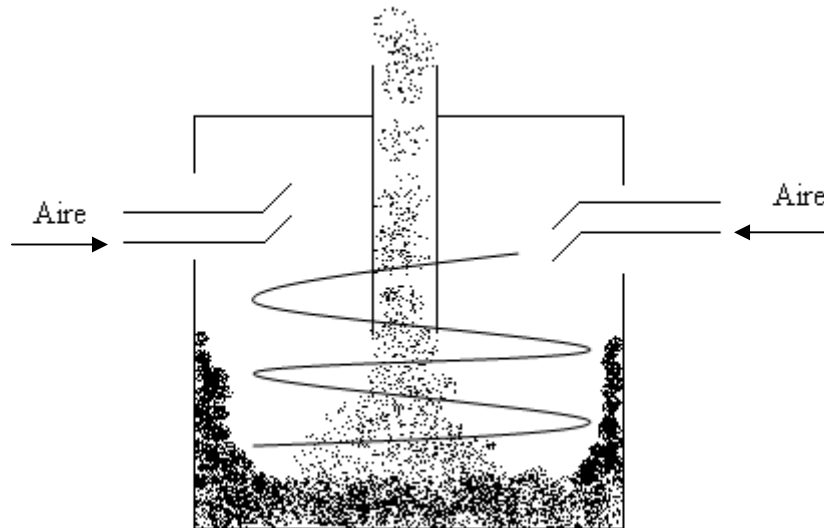


FIGURA 5.17: Esquema de un separador ciclón

## 5.6 ESQUEMA DE LA INSTALACIÓN

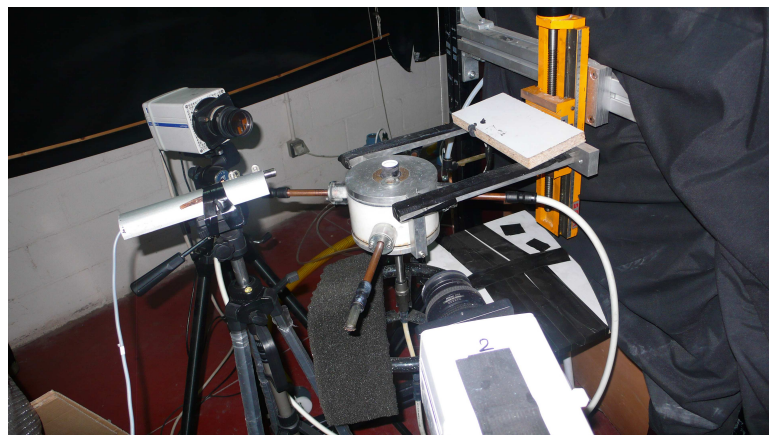


FIGURA 5.18: Fotografía de la instalación

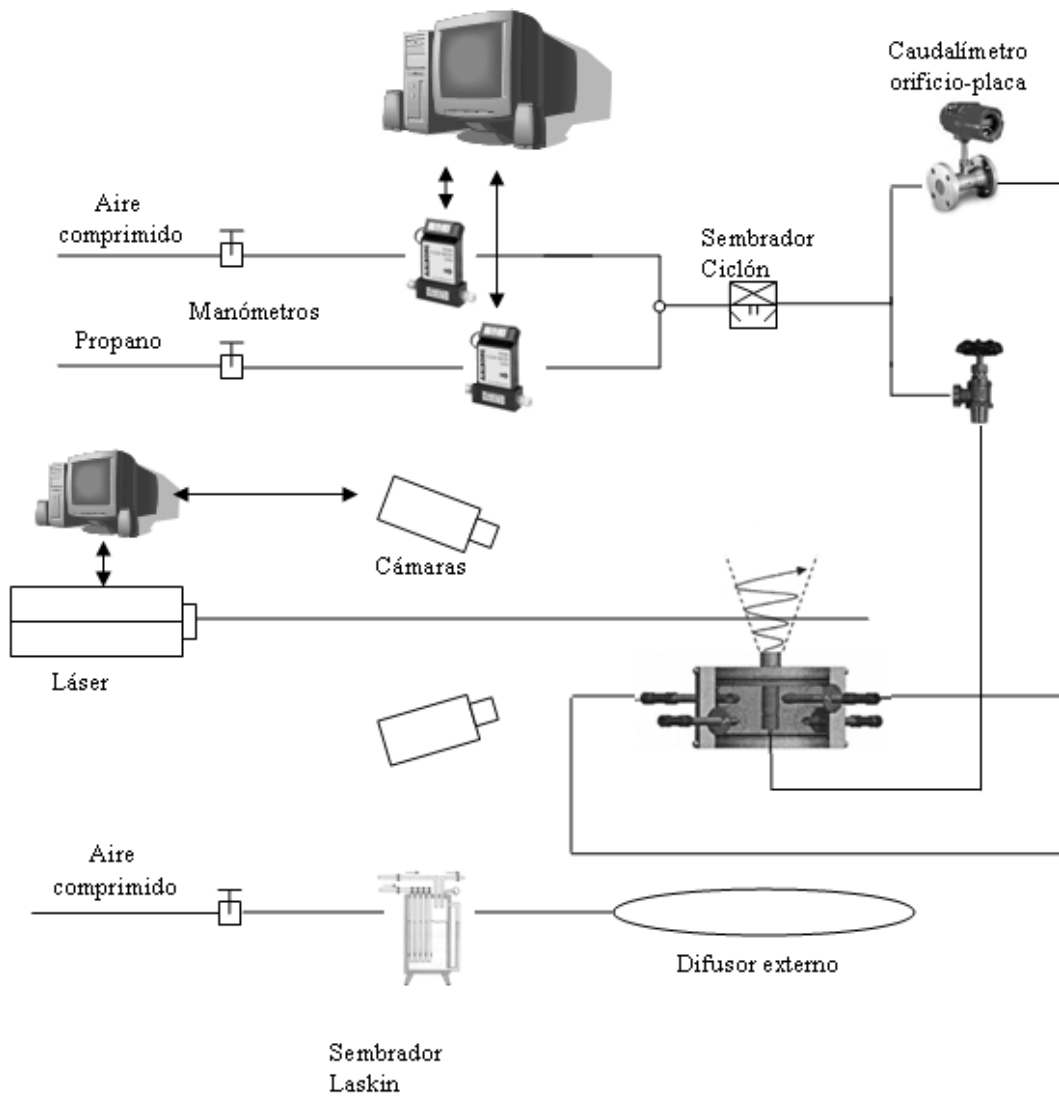


FIGURA 5.19: Esquema de la instalación

## *CAPÍTULO 6*

# RESULTADOS EXPERIMENTALES

### Índice general

---

6.1	ESTUDIO DEL CAMPO ACÚSTICO .....	75
6.2	ESTUDIO MEDIANTE PIV .....	84
6.3	ANÁLISIS DE LA FRECUENCIA DE TORBELLINOS .....	95

---

En los capítulos anteriores se han descrito las características del flujo con giro, los principios básicos de la técnica de medida basada en la velocimetría por imágenes de partículas y se han descrito las instalaciones del laboratorio en el cual se llevaron a cabo los experimentos. Se procede ahora a exponer los resultados obtenidos en el mismo.

Los resultados se dividen en dos bloques fundamentales; un primero en el que se analiza el campo acústico lejano producido por el propio flujo con objeto de establecer un rango de condiciones de operación para los cuales el flujo comienza a comportarse de manera inestable y un segundo proceso en el que se realiza un análisis más complejo y profundo del comportamiento del flujo a la salida del quemador, gracias a la técnica de medida de velocimetría por imágenes de partículas.

A partir de estos análisis se tratará de establecer una relación entre ambos y de establecer el rango de datos para los cuales la llama puede considerarse estable.

Como se comentó anteriormente, no se han realizado medidas de velocimetría de imágenes de partículas en el flujo reactivo porque se trata de unas condiciones de medida muy complicadas. La concentración de las partículas del sembrado varía enormemente en función de si éstas se encuentran en la zona de productos de la llama o en los gases frescos. Esto se debe a la brusca expansión térmica que sufren los gases detrás de la llama. De hecho, muy pocos centros de investigación en el mundo han conseguido realizar con éxito este tipo de experimentos (con PIV estereoscópico solo el equipo de Per Petersson en Suecia lo ha conseguido).

## **6.1 ESTUDIO DEL CAMPO ACÚSTICO**

Antes de comenzar con el procesado de datos en PIV, se realizó una exploración del flujo de manera acústica, para conocer en que regímenes existían inestabilidades. Para ello, se decidió analizar el campo acústico del fluido a la salida del quemador, lo cual aportaría una idea aproximada de los regímenes de trabajo para los cuales el flujo comenzaría a comportarse de manera inestable.

Como se comentó en el capítulo 3, los flujos con giro comienzan a ser inestables a partir de un número de swirl crítico  $S > 0.6$ , principalmente debido al fenómeno de rotura del vórtice. Para estos casos, las inestabilidades generan fluctuaciones locales importantes de velocidad y presión, a determinadas frecuencias. Dichas frecuencias pueden detectarse en el espectro de velocidad o presión, presentando picos por encima del nivel de fondo, característico de la turbulencia estocástica. (aleatorio, en base a probabilidades)

Se han realizado medidas de presión en el campo acústico cercano para distintas configuraciones del quemador, variando por un lado la entrada de aire por la tobera central mediante la regulación de la válvula de paso y por otro lado el caudal de aire tangencial que entra al quemador. Se situó un micrófono a 15 cm del eje del quemador en el plano de salida de la tobera. El micrófono (de marca Brüel & Kjær) es de media pulgada y de alta respuesta en frecuencia ( $>20$  kHz). Tras amplificar la señal, esta se digitaliza en un canal de 16 bits a 44.1 kHz.

Con objeto de obtener los espectros, se grabó la señal de presión durante un minuto. La señal se dividió en 120 segmentos iguales, de 500 ms. Se promediaron las 120 autocorrelaciones para obtener el espectro acústico en frecuencias. Los niveles de presión acústica registrados para cada frecuencia presentan las características del denominado ruido rosa típico de la turbulencia estocástica. Por encima de este nivel “base” aparecen unos picos cuya posición e intensidad dependen claramente del número de Reynolds.

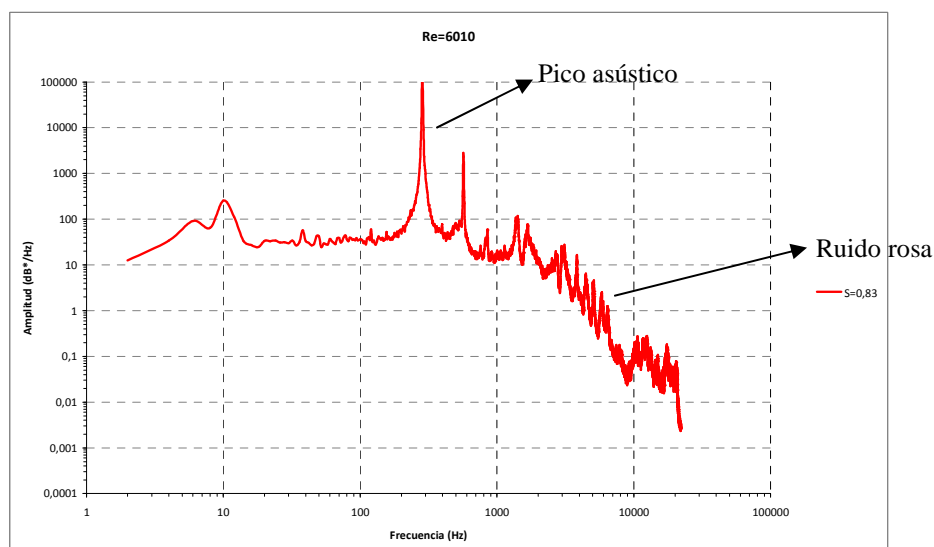
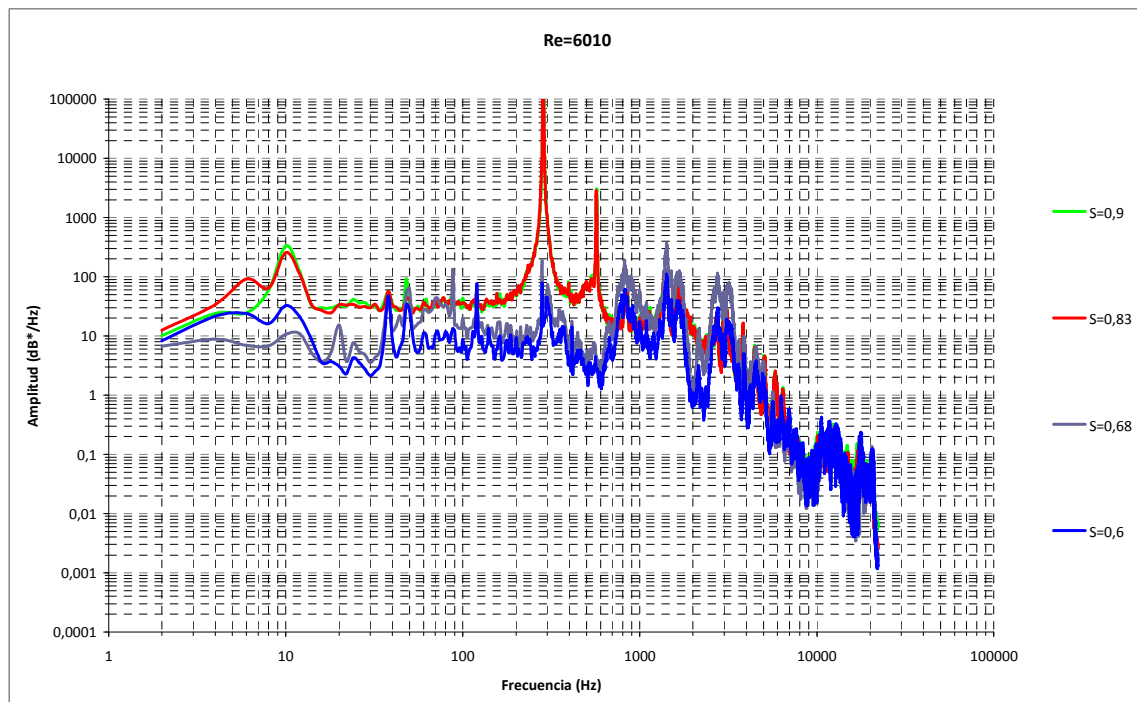


FIGURA 6.1: Espectros acústicos para  $S = 0,83$



A continuación, se pasa al procesado de estos datos a través de un programa realizado con MatLab. Para ello, se aplica a todos los segmentos de 0.5 s la transformada de Fourier digital, que nos permite redefinir las señales en términos de suma de señales sinusoidales, es decir, convertimos la señal del campo temporal a su espectro en frecuencia. De este modo podemos observar a qué frecuencias la señal muestra “picos” que se corresponderán con los puntos en los que el flujo comienza a comportarse de manera diferente; este cambio en el comportamiento del flujo se tratará de determinar más adelante gracias a las técnicas de PIV.

Se muestra a continuación los espectros acústicos para un  $Re_D$  cualquiera, en este caso  $Re_D = 6010$ :



**FIGURA 6.2: Espectros acústicos para  $Re=6010$**

Puede observarse claramente un pico de frecuencia a unos 250 Hz para determinados valores del número de Swirl, lo cual indica que para ese S y ese  $Re_D$  existirá inestabilidad acústica. Sin embargo, también puede observarse la ausencia de pico acústico para los valores del número de Swirl más pequeños, en los que no existe inestabilidad acústica.

De cara a facilitar el proceso de detectar a partir de que condiciones aparece el pico (con objeto de establecer un diagrama de transición), se utiliza un programa informático (Oscillometer Spectrum Analyzer Real-time FFT, disponible en la dirección web <http://shmelyoff.nm.ru/>) el cuál muestra en tiempo real el comportamiento en frecuencia del espectro acústico tras aplicar la transformada de Fourier, lo que permite comprobar directamente para que condiciones el espectro muestra un pico en frecuencia.

Para estos experimentos, regulamos por una parte, a través de los programa de ordenador asociado a los caudalímetros digitales, el caudal de aire que entra a la cámara de forma axial y por otra parte el caudal de flujo que entra en la cámara a través de las entradas tangenciales con codos a 90° mediante la manipulación manual de la válvula de paso. Se comprueba que desde que esta válvula se encuentra completamente abierta hasta impedir paso alguno de flujo hay 22 vueltas del dispositivo regulador de la válvula, luego estableceremos el flujo tangencial en función del número de vueltas de esta válvula (aunque a efectos prácticos, también se trabaja con el valor adimensional de la apertura de la válvula  $\alpha$ . El valor nulo corresponde a la válvula cerrada y el valor 1 cuando la válvula esta abierta al máximo).

$$\alpha = \frac{22 - V_g}{22} \quad (6.1)$$

Siendo  $V_g$  el número de vueltas de la válvula que regula el flujo radial desde su estado de completamente abierta.

El análisis dimensional del quemador revela que son necesarios 2 parámetros para definir el giro a la salida del quemador. El numero de Swirl por si solo, solo proporciona información sobre la relación de momento angular a momento lineal, pero no aporta ningún tipo de información sobre la distribución radial del mismo, y es un factor aparentemente importante en el comportamiento del flujo. Para comprobar como afecta la distribución radial del flujo al comportamiento global se van introduciendo en el quemador los brazos con codos a 90° de 5 en 5 milímetros, según unas muescas realizados en los mismos, para así variar el giro generado en el interior de la cámara.

Definimos dos variables adimensionales para determinar el número de Swirl. Por una parte, aquella que directamente relaciona la cantidad de momento lineal con el momento angular, a la que denominamos  $S_r$

$$S_r = \frac{R_e^2 \cdot (1 - \alpha)}{R_{\max}^2} \quad (6.2)$$

Siendo  $R_e$  la posición de los brazos de entrada a la cámara.  $R_{\max}$  tiene un valor de 59cm, y cada posición que introducimos los brazos son 5cm menos de radio, es decir:

- $R_e = 59$  mm para  $R=9$
- $R_e = 54$  mm para  $R=8$
- $R_e = 49$  mm para  $R=7$
- $R_e = 44$  mm para  $R=6$

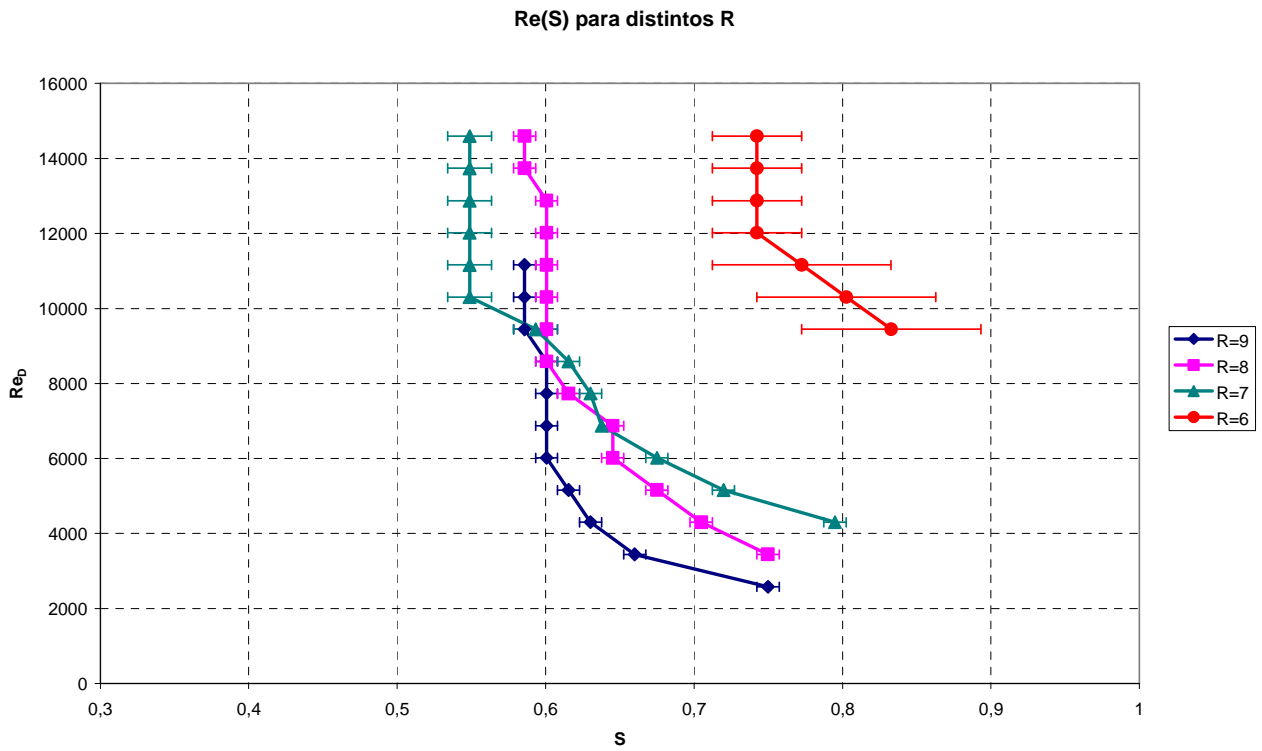
Y por otra parte, un número de Swirl calculado en anteriores experimentos realizados en el mismo quemador con un valor de:

$$S = 0.0173 \cdot \alpha^2 - 0.6678 \cdot \alpha + 0.8932 \quad (6.3)$$

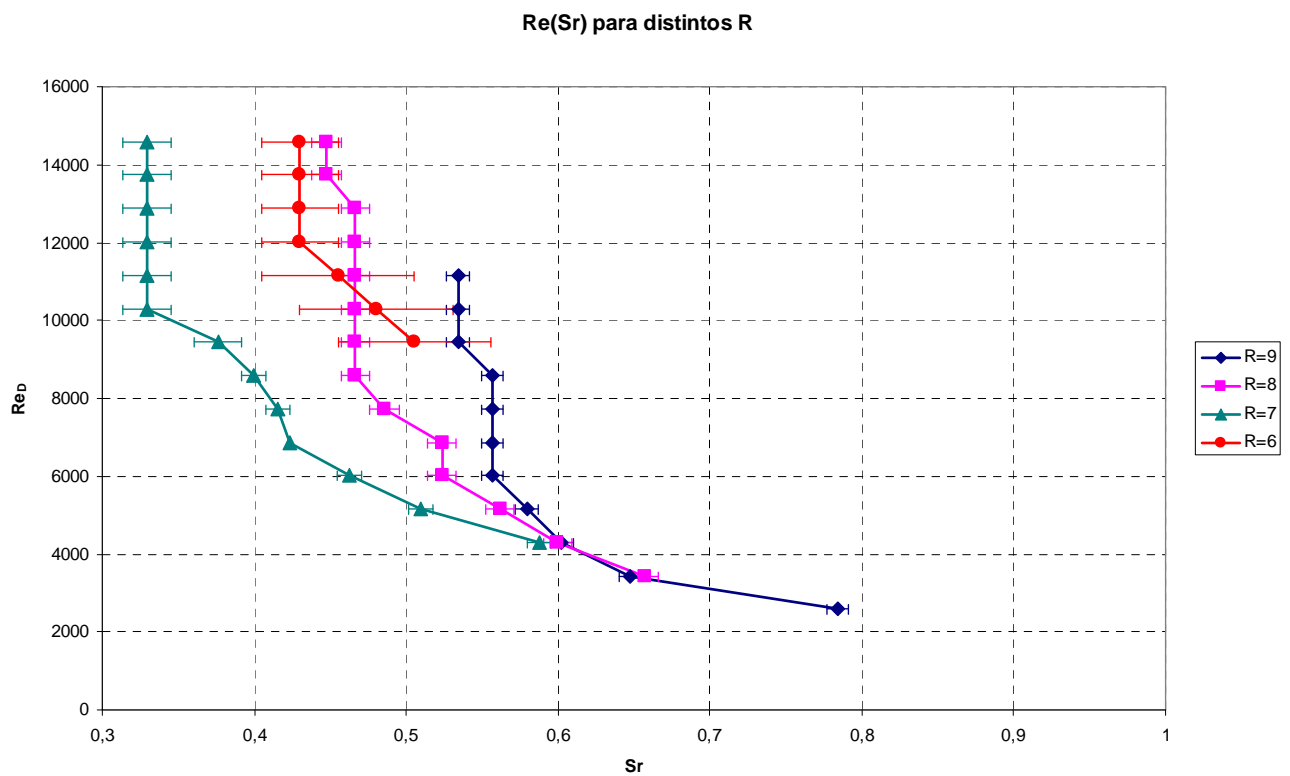
Por tanto, en el laboratorio vamos calculando los valores de  $V_g$  para las distintas configuraciones de entrada de los tubos radiales en el quemador ( $R$ ), que van desde  $R=5$  hasta  $R=9$  en función de unas muescas marcadas en los conductos ( $R=9$  corresponde a los tubos lo más afuera posible). A partir de estos datos, obtenemos los valores de  $\alpha$ ,  $S_r$  y  $S$ , además del Reynolds ( $Re_D$ ) que se deriva directamente del caudal másico del flujo axial.

Debido a la posible histéresis de los resultados, se anotaron los valores de  $V_g$  tanto a medida que cerrábamos la válvula como a medida que la abríamos. Para facilitar la visualización de los resultados, se calcula la media entre ambos valores y se indica el error correspondiente a dicha operación.

Se muestran a continuación las gráficas de  $Re_D$  en función de  $S$  y  $S_r$  para todos los casos (para  $R=5$  no se considera dado que no existe inestabilidad acústica para ninguna configuración):



**FIGURA 6.3: Re (S) para todos los R**



**FIGURA 6.4: Re (Sr) para todos los R**

Podemos comprobar, en primer lugar, la clara relación existente en ambas gráficas según la cual el  $Re_D$  necesario para pasar a flujo inestable disminuye a medida que aumentamos el  $S$  o  $S_r$ . Es decir, cuanto más giro inducimos al flujo, menos  $Re_D$  necesita para comenzar a presentar inestabilidades.

Por otra parte, podemos comprobar como la aproximación de  $S_r$  presenta la misma forma que el caso de  $S$  solo que desplazado hacia  $Re_D$  menores, debido posiblemente al carácter puramente teórico de la ecuación de  $S_r$ , frente a la comprobación experimental realizada para el cálculo de  $S$ .

Además, se observa cierto patrón de comportamiento según el cual a medida que introducimos los brazos en la cámara, se necesitan números de Swirl globales más elevados para inestabilizar el flujo, lo que se debe al hecho de que el Swirl en el anillo exterior será más elevado cuanto más afuera estén situados los brazos.

Pasamos ahora a representar estos resultados en una superficie con  $Re$ ,  $V_g$  y  $R$  como coordenadas.

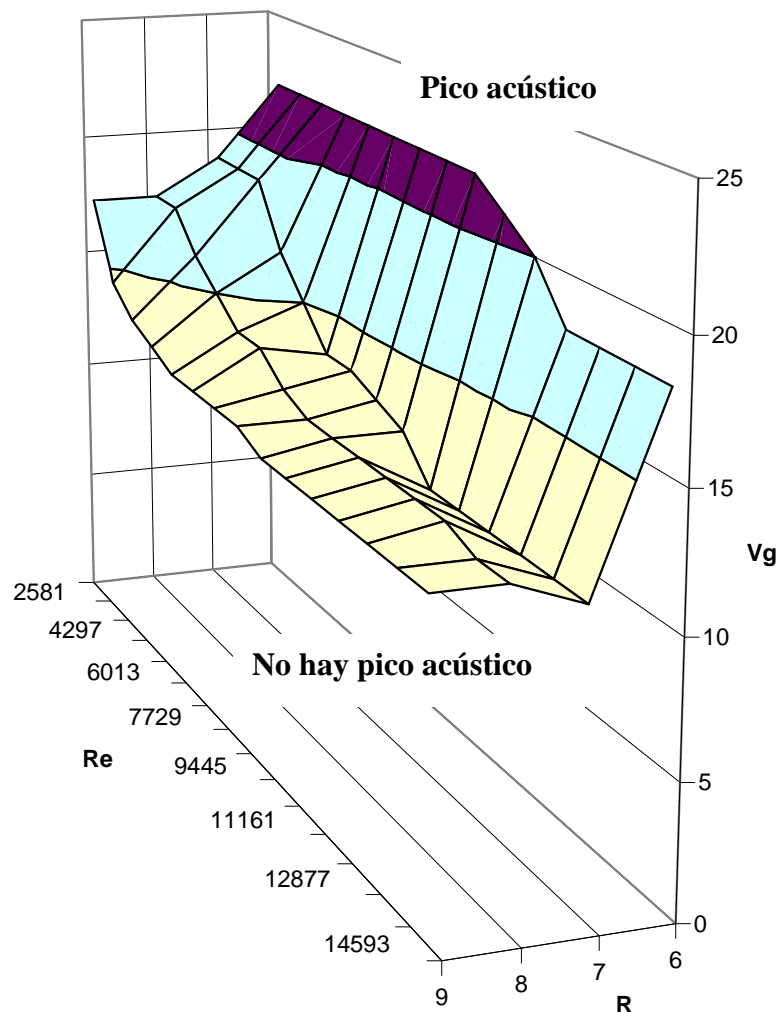


FIGURA 6.5:  $Re(S_r)$   
para todos los  $R$

De este modo, podemos cumplir uno de los objetivos principales del proyecto, que se trata de establecer el criterio de que todas aquellas configuraciones de valores que queden por encima de esta gráfica habrán superado el límite de estabilidad del flujo y por tanto generarán zonas de recirculación, es decir, se generarán vórtices que originarán picos acústicos de frecuencia.

Más adelante, y gracias a la adquisición por parte de la Universidad de un nuevo conjunto de caudalímetros, pudimos medir el flujo que entraba de manera tangencial en la cámara a través de los codos. Como además ya conocíamos el flujo axial, ahora somos capaces de establecer la relación de flujo tangencial y flujo axial que era uno de los factores que nos permitía regular el número de Swirl.

Con objeto de mejorar el conjunto de resultados volvimos a realizar todas las medidas acústicas anotando la el cociente entre el flujo tangencial y el total (igual al axial más el tangencial) además de la frecuencia a la que se producía el pico acústico, gracias al programa Oscillometer Spectrum Analyzer Real-time FFT.

Se muestra a continuación la curva de transición acústica para el caso de  $R = 9$ , que se obtiene uniendo aquellos puntos en los cuales deja de existir la inestabilidad acústica.

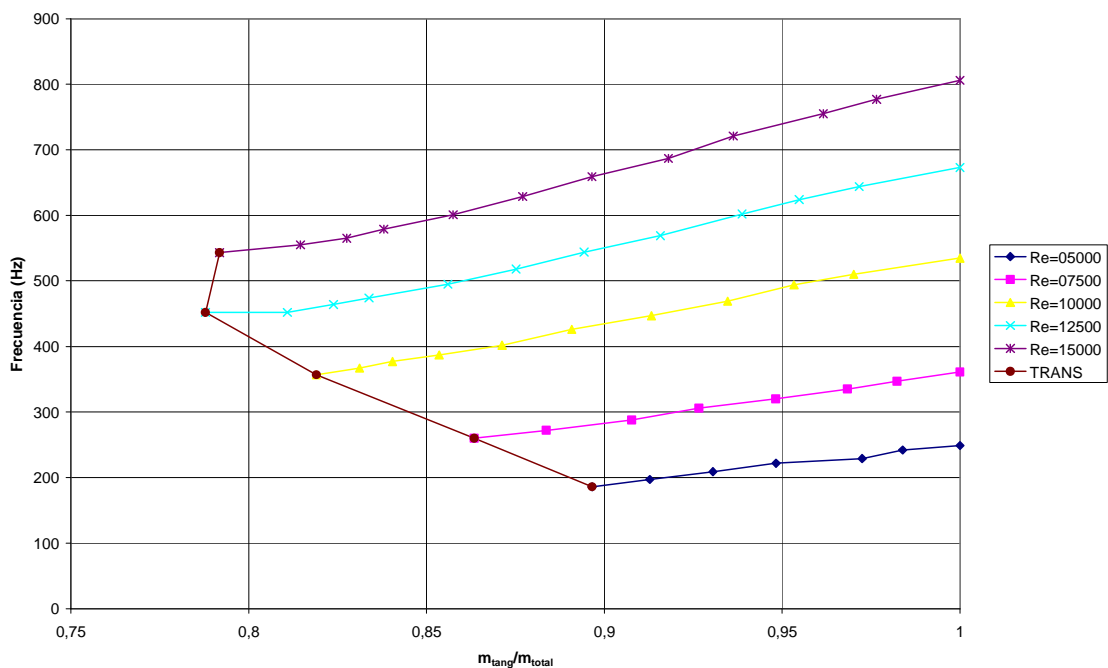
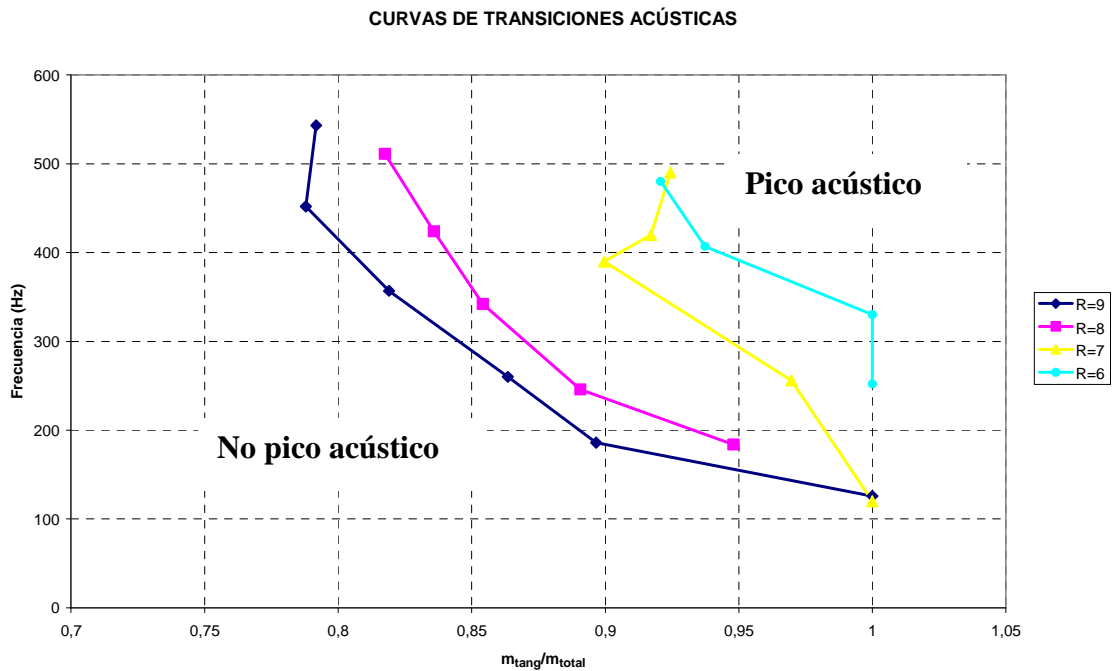


FIGURA 6.6: Curva de transición acústica para  $R = 9$

Representamos a continuación la curva de transición acústica para los distintos valores de entrada de los brazos en la cámara.



**FIGURA 6.7: Curva de transiciones acústicas**

Podemos establecer a partir de la gráfica anterior que para una misma frecuencia, la relación entre el flujo tangencial y el total necesario para provocar la transición acústica será menor a medida que aumentamos el radio de entrada de los tubos con codos. Además, para valores de R más elevados, la relación de gasto másico necesario para la transición es cada vez menor.

Puede observarse también como la curva de transición tiende a la vertical para una determinada relación de gasto másico, que corresponderá a la relación entre gasto tangencial y gasto total mínima para que se produzca transición acústica.

## **6.2 ESTUDIO MEDIANTE PIV**

### **6.2.1 INTRODUCCIÓN**

Se analizarán a continuación los distintos tipos de flujo para numerosas condiciones con mediciones realizadas mediante velocimetría por imágenes de partículas estereoscópicas (S-PIV).

En primer lugar se pasa al encendido del equipo láser, compuesto por todos los equipos informáticos asociados al aparato así como al propio generador láser. A continuación, y tras una minuciosa calibración de los sistemas, se pasaron a hacer una serie de disparos del haz láser con objeto de establecer las condiciones óptimas de sembrado, tratando de ajustar lo máximo posible las partículas de sembrado en la zona central del quemador y evitando perturbaciones en el flujo debidas al propio sembrado.

A continuación se pasan a realizar 100 medidas instantáneas para distintas configuraciones de  $Re$ , y  $R$  para el flujo frío. El comportamiento del flujo frío se asemeja en gran medida al flujo con llama, sobretodo en cuanto a zonas de transición a flujo inestable que es lo que realmente nos interesa estudiar.

La recirculación del flujo se produce cuando éste se invierte debido a la existencia de zonas de baja velocidad debidas a la apertura del flujo a la salida de la tobera, lo que implica la inversión de la velocidad axial del flujo y su consiguiente recirculación.

### **6.2.2 TIPOS DE FLUJO**

En función del comportamiento del flujo en cuanto a existencia o no de zona de recirculación y dependiendo de dónde ésta se encuentre, podemos establecer una clasificación de los flujos en 3 categorías:



- TIPO 0: No existe recirculación alguna en el flujo. Las baja velocidades no son suficientes como para generar divergencia capaz de reducir la velocidad axial cerca del eje, por lo que no existe ni zona de baja velocidad ni una clara recirculación.
- TIPO I: Existe una leve recirculación, pero el flujo se invierte aguas abajo de la tobera. Realmente lo que se produce es mas una deceleración hasta velocidades bajas, capaces de estabilizar la llama, que una recirculación propiamente dicha.
- TIPO II: Existe una fuerte recirculación donde el flujo se invierte aguas arriba de la tobera. El flujo se abre bruscamente a la salida de la tobera y se generan velocidades tan bajas que provocan la inversión de la velocidad axial y su consiguiente recirculación.

Pasaremos a continuación a identificar un ejemplo representativo de cada tipo de flujo de todo el conjunto de medidas realizadas. Para ello, se utiliza el programa TecPlot, el cual procesa todos los datos de velocidades axiales, tangenciales y radiales obtenidas a través del Davis y permite su representación gráfica. Se mostrarán en colores las velocidades axiales, representando además los vectores correspondientes a las mismas para diversas secciones del chorro. Además, y de cara a establecer correctamente la presencia o no de zonas de recirculación, se representan con una línea blanca las zonas de velocidad axial nula, lo que implica una recirculación en el flujo (bien aguas abajo de la tobera o bien introduciéndose en la propia tobera). Las zonas con múltiples líneas blancas a los laterales del flujo de estudio se deben a zonas de ruido en las que el sembrado no fue uniforme y las que se encuentran debajo de la tobera se debe a la no realización de medidas en dicha zona por parte del láser para evitar posibles reflexiones.

Además, se muestran solo uno de cada 8 vectores en la dirección axial, para más claridad.

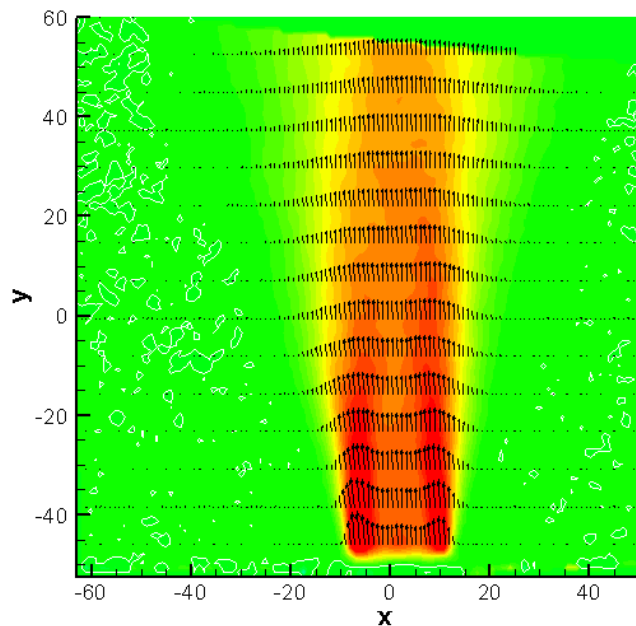


FIGURA 6.8: TIPO 0

### TIPO 0

( $R=6$ ,  $Vg=10$ ,  $Re=5740$ )

No existe ninguna recirculación, comportándose el flujo como un chorro. Se muestra un pequeño decaimiento de la velocidad en la zona media al inicio del flujo, pero insuficiente como para hacerlo recircular.

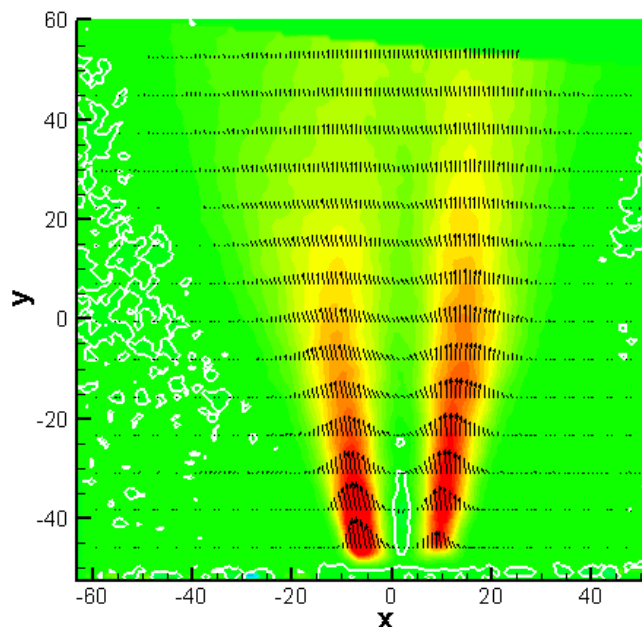


FIGURA 6.9: TIPO I

### TIPO I

( $R=6$ ,  $Vg=16$ ,  $Re=5740$ )

Se produce un apreciable decrecimiento de velocidades que consigue estabilizar la llama, pero no invertir el sentido del flujo. La recirculación se produce aguas arriba de la tobera.

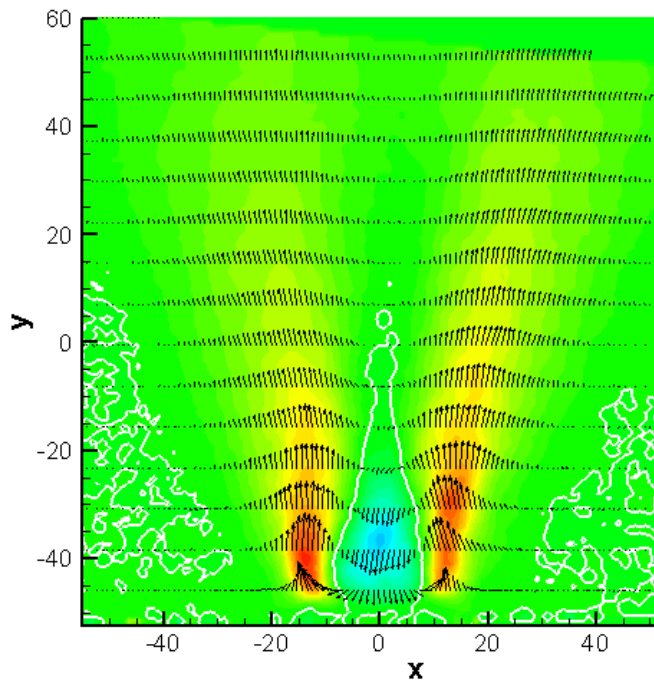


FIGURA 6.10: TIPO II

### TIPO II

( $R=8$ ,  $V_g=22$ ,  $Re=5740$ )

La apertura del flujo y el descenso tan elevado de las velocidades provocan una clara recirculación del flujo en la tobera que consigue estabilizar la llama. Como puede observarse, la línea blanca de velocidades axiales nulas queda por debajo de la tobera de salida.

Se muestran a continuación todos los tipos de flujos obtenidos para el conjunto de configuraciones adoptadas.

	R = 5	R = 6	R = 7	R = 8	R = 9
Vg = 22	0	0	0	0	0
Vg = 19	0	0	0	2	2
Vg = 16	0	1	1	2	2
Vg = 13	0	2	2	2	2
Vg = 10	0	2	2	2	2

TABLA 6.1: TIPOS DE FLUJO PARA DISTINTOS R Y Vg

Cabe señalar que la zona amarilla de velocidades situada justo por debajo de la zona roja en la salida de la tobera no se corresponde con velocidades reales del fluido, sino que es debido a la inclinación con la que el haz láser incide sobre las partículas trazadoras.

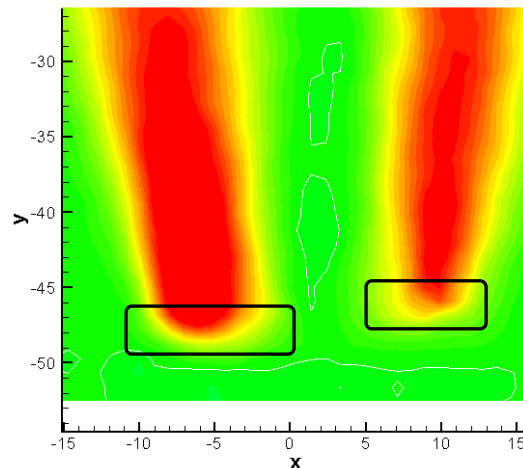


FIGURA 6.11: Detalle salida tobera

Esta inclinación del haz láser provoca que la correlación de imágenes se lleve a cabo en ventanas de interrogación con grandes zonas donde no se detectan partículas, que junto al echo de que aparezcan partículas que no se detectaron en la primera imagen pero que sí que estaban presentes, provoca que la velocidad resultante en estas zonas sea notablemente inferior a la real.

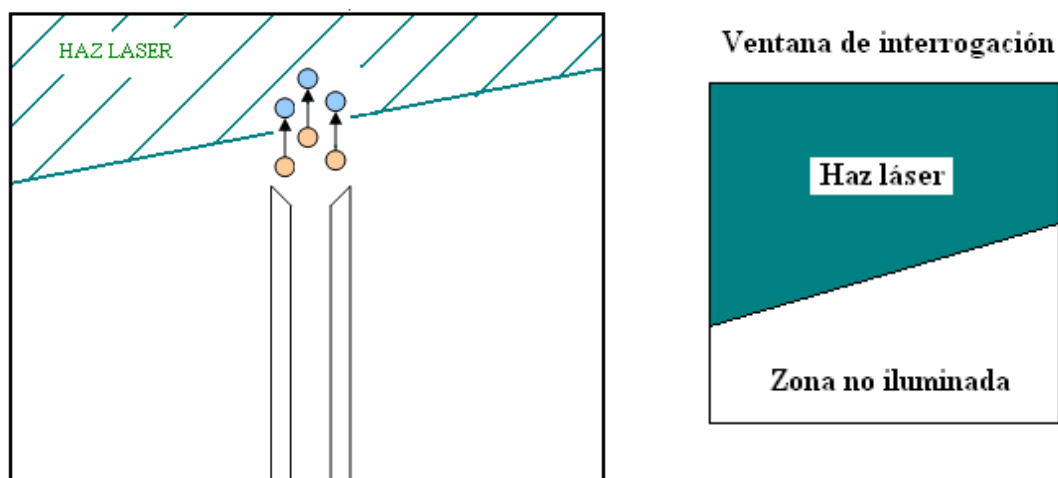


FIGURA 6.12: Errores en velocidades debido a la inclinación láser

### 6.2.3 PERFILES DE VELOCIDADES

Gracias al procesado de los datos obtenidos del programa Davis se consigue representar gráficamente los perfiles de velocidades medias de todos los casos de estudio a una determinada altura desde la salida de la tobera. En nuestro caso, las medidas se toman a una altura que corresponde a -45 mm medidos desde el centro del blanco de calibración y en el centro de la tobera. A continuación, se mostrarán estos perfiles para los tres tipos de flujos determinados anteriormente, teniendo en cuenta el siguiente criterio de velocidades:

- $V_x$  = Velocidad radial
- $V_y$  = Velocidad axial
- $V_z$  = Velocidad tangencial

TIPO 0 ( $R=6$ ,  $V_g=10$ ,  $Re=5740$ )

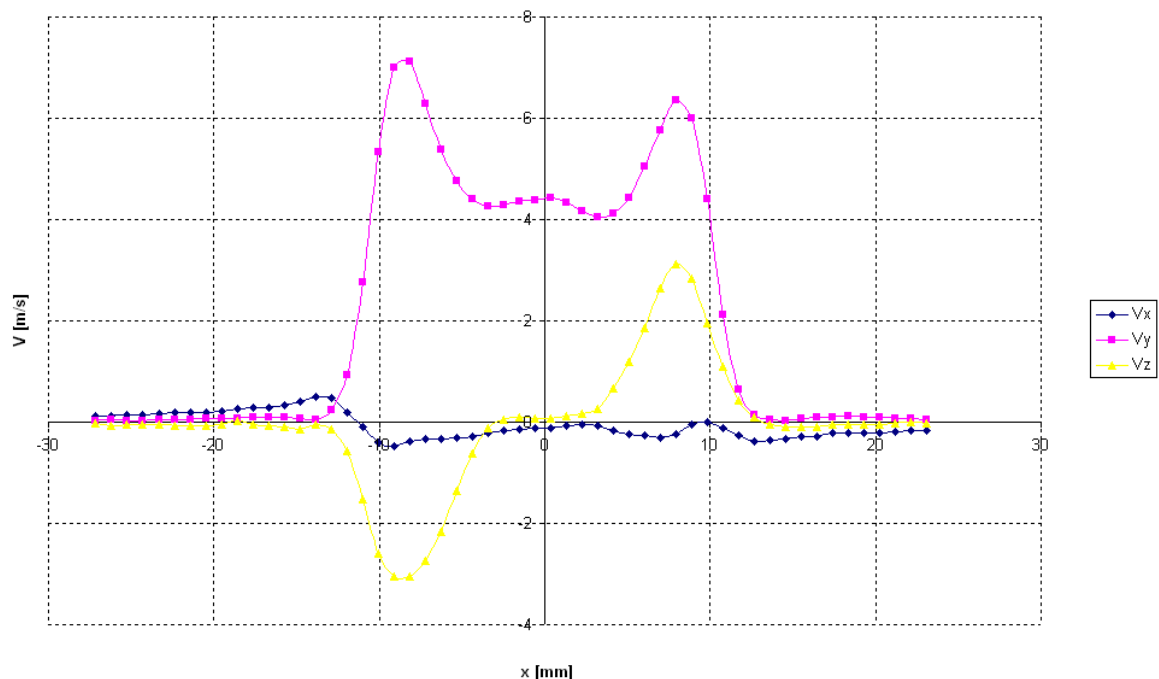


FIGURA 6.13: Perfiles de velocidades para tipo 0

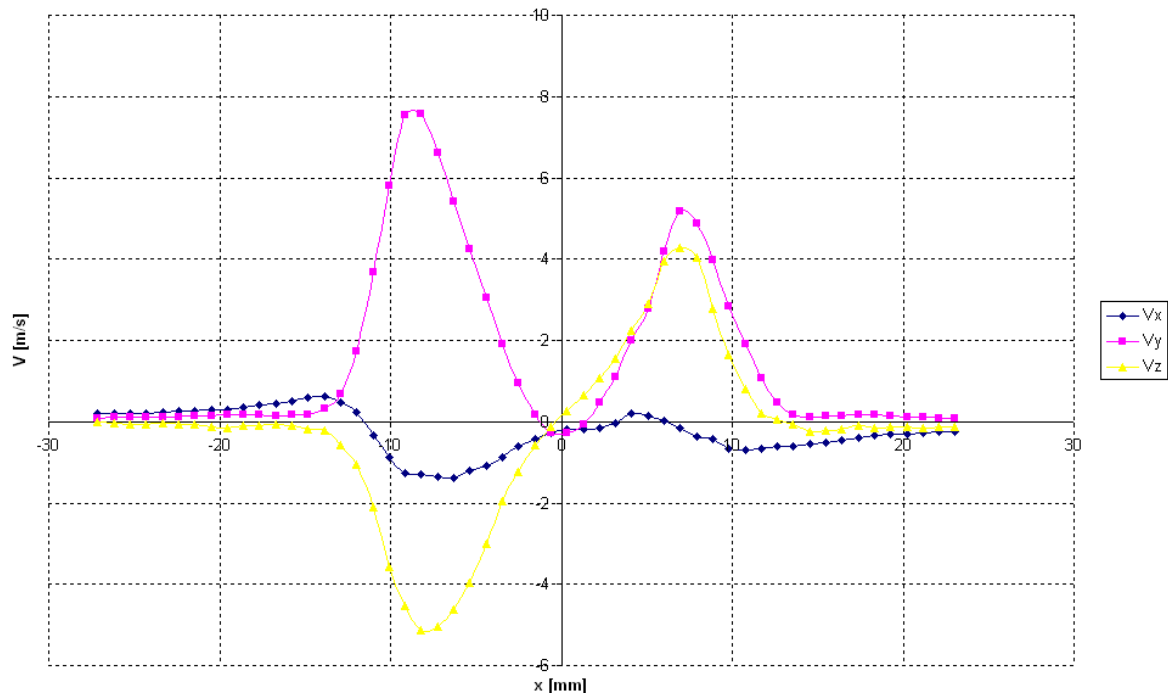
TIPO I ( $R=6$ ,  $V_g=16$ ,  $Re=5740$ )

FIGURA 6.14: Perfiles de velocidades para tipo I

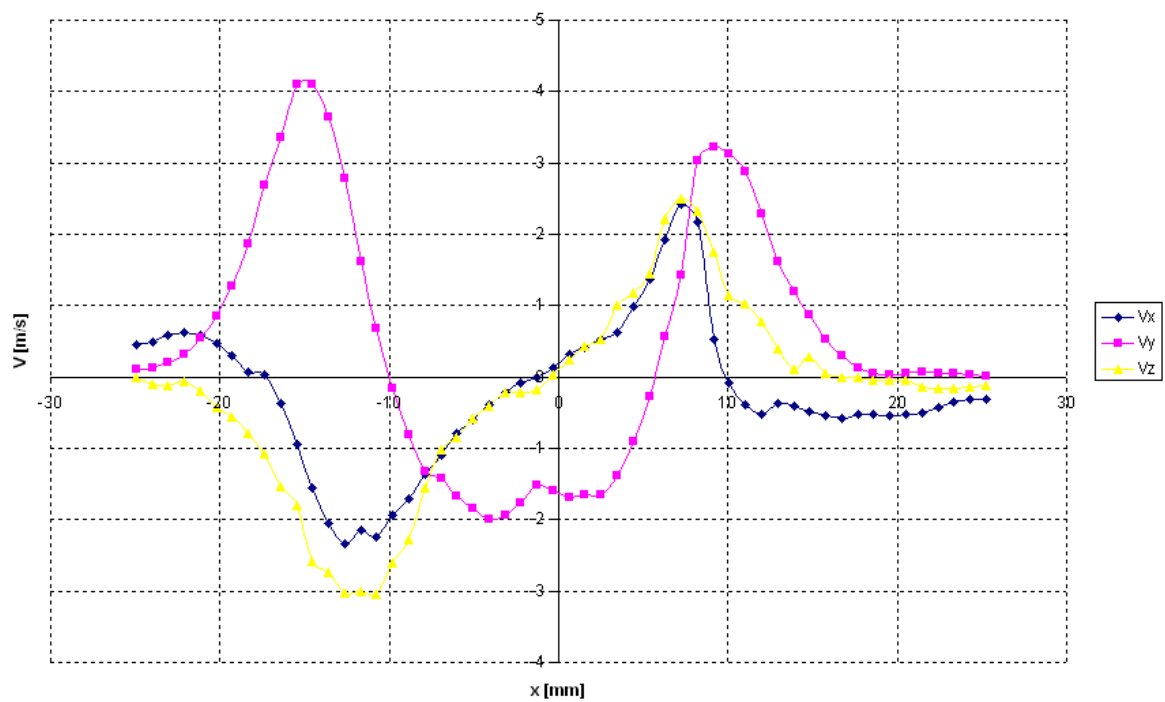
TIPO II ( $R=8$ ,  $V_g=22$ ,  $Re=5740$ )

FIGURA 6.15: Perfiles de velocidades para tipo II

La velocidad radial ( $V_x$ ) muestra la velocidad con la que el flujo tiende a abrirse, es decir, indica la velocidad de apertura del chorro, que es mucho más acusada en los casos con mayor recirculación que en los casos sin ella, como en flujos tipo 0.

Atendiendo a la velocidad axial ( $V_y$ ) puede determinarse el tipo de flujo en función de si presenta o no recirculación, y en el caso de tenerla, definir si ésta se produce aguas arriba o aguas abajo de la tobera. Se observa como en los flujos con recirculación esta componente de la velocidad se hace nula (flujo tipo I) o incluso se hace negativa (flujo tipo II), es decir, la componente axial de la velocidad es capaz de contrarrestar la velocidad del flujo a la salida de la tobera, luego el flujo consigue recircular.

La velocidad tangencial ( $V_z$ ) representa la velocidad con la que el flujo está girando en cada posición. Gracias a los perfiles podemos observar como esta velocidad de giro es mayor en aquellos casos en los que tenemos una recirculación más significativa. Además, en los extremos se aprecia una zona de velocidad radial hacia el eje, característica de la ingestión de fluido ambiente.

6.2.4 CAMPOS DE VELOCIDADES

Como se comentó anteriormente, el procesado de los datos por medio del programa TecPlot nos permite la visualización del campo de velocidades para cualquier componente, en nuestro caso representamos la axial.

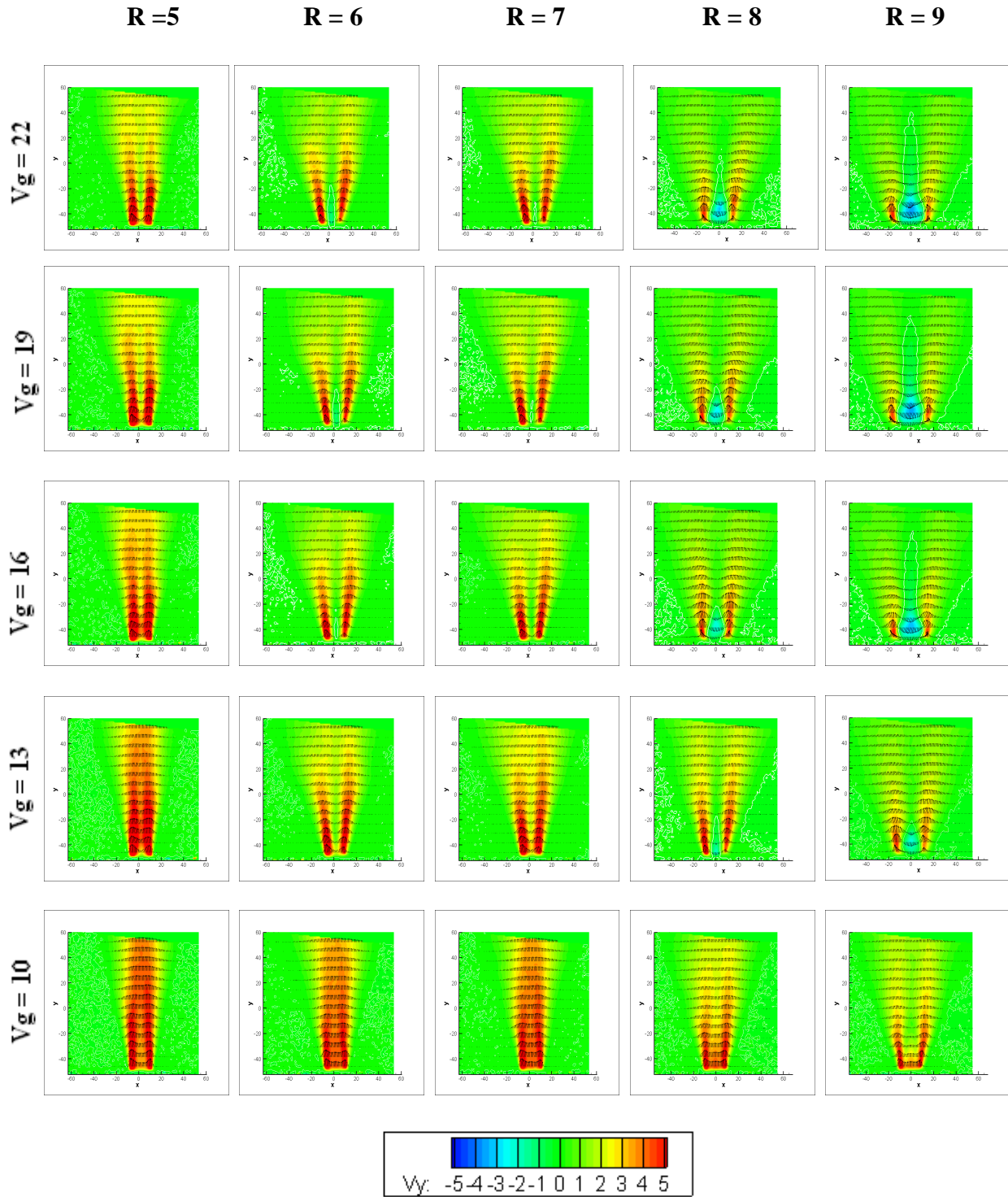


FIGURA 6.16: Campos de velocidades



Es apreciable la tendencia a la apertura del chorro para mayor apertura de la válvula así como una mayor recirculación para configuraciones con altos  $R$ , es decir, que a mayor apertura de los brazos con codos a  $90^\circ$ , mayor Swirl y por tanto mayor tendencia a recircular.

### 6.2.5 ÁNGULO DE APERTURA

Con el fin de estudiar la divergencia provocada en el flujo a la salida de la tobera, se define un ángulo que corresponde al formado por la vertical en el centro de la tobera con la proyección en la horizontal de la máxima velocidad medida a una determinada altura, en este caso a la altura de un diámetro de tobera.

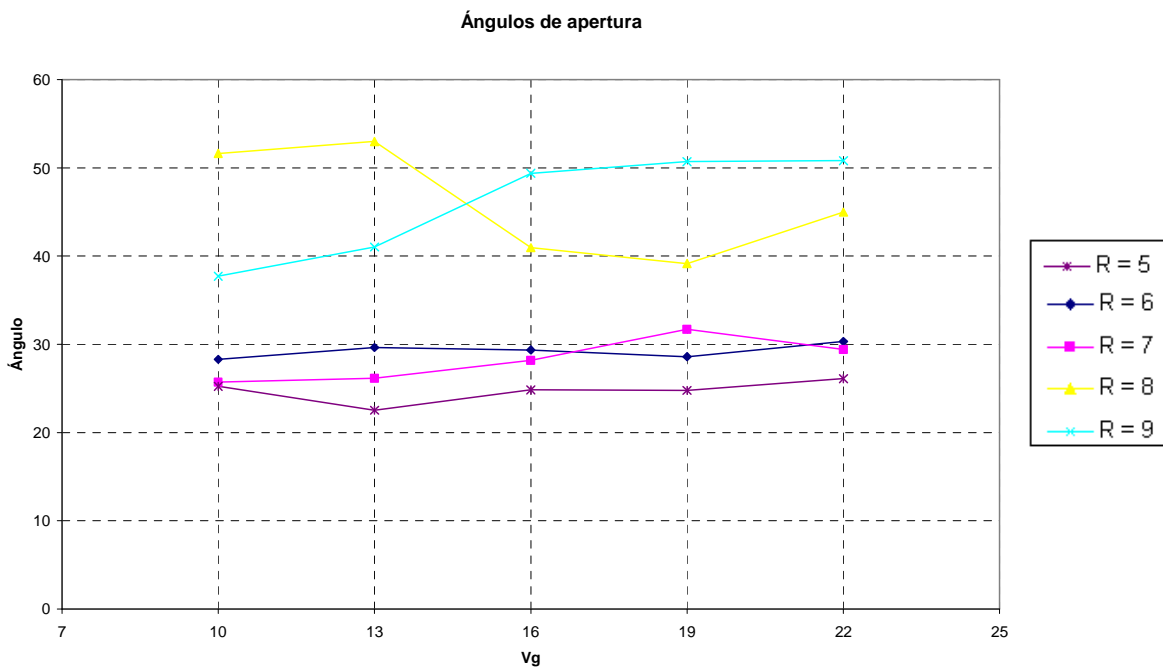


FIGURA 6.17: Ángulos de apertura

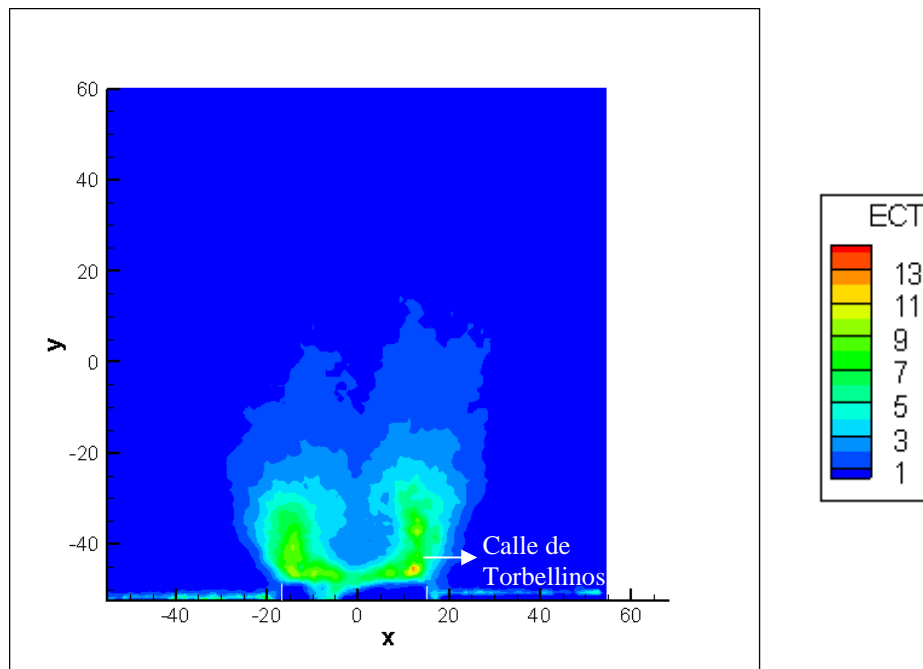
Podemos comprobar como para los casos en los que no se produce una gran recirculación en el centro del chorro ( $R = 5$ ,  $R = 6$  y  $R = 7$ ) los ángulos de apertura son más reducidos y varían mucho menos a medida que abrimos la válvula, es decir, la divergencia del flujo no es tan acusada. Sin embargo, para aquellas configuraciones en las que sí se produce esa fuerte recirculación ( $R=8$  y  $R = 9$ ), ésta provoca variaciones en los ángulos mucho mayores, bien aumentando notablemente el ángulo de apertura como

en  $R = 9$  o bien tendiendo incluso a reducir ese ángulo como consecuencia de la fuerte recirculación como en  $R = 8$ .

### 6.2.6 ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA

Con objeto de evaluar la precisión de las medidas realizadas, se han computado las fluctuaciones de las velocidades, lo que nos permite establecer una intensidad turbulenta o energía cinética turbulenta.

$$ECT = \frac{1}{2} \cdot (V_x'^2 + V_y'^2 + V_z'^2) \quad (6.4)$$



$R = 9, Vg = 22, Re = 10000$

**FIGURA 6.18: Energía cinética turbulenta**

Se observa como la energía cinética turbulenta es mayor en aquellas regiones del flujo en las que existe mayor gradiente de velocidad, por lo que las fluctuaciones en las medidas realizadas en dichas zonas serán más relevantes. Además, las calles de torbellinos generan continuos gradientes de velocidades que originan zonas de ECT muy elevadas en zonas puntuales en regiones próximas a la salida de la tobera.

### 6.3 ANÁLISIS DE LA FRECUENCIA DE TORBELLINOS

Como hemos visto, cuando el flujo comienza a comportarse de manera inestable se generan vórtices de presión que originan picos acústicos de presión a una frecuencia que somos capaces de conocer gracias al programa Oscillometer Spectrum Analyzer Real-time FFT.

Por otra parte, gracias a las técnicas de PIV somos capaces de determinar el campo de velocidades instantáneo del flujo de estudio así como de obtener imágenes instantáneas que muestran el comportamiento de las partículas en numerosos instantes de tiempo.

A continuación se estudiará la analogía entre estos dos métodos de estudio mediante la comparación de la frecuencia obtenida en el estudio acústico con una frecuencia de vorticidad calculada a través de los datos obtenidos en PIV.

Con objeto de mejorar la precisión del análisis, se estudia un caso en profundidad, realizando 1000 medidas instantáneas de PIV en lugar de las 100 que se realizan en el resto de casos.

El caso elegido es el de  $R = 9$ ,  $Re = 10000$  y  $Vg = 22$ , el cual posee una frecuencia de liberación de vórtices de 535 Hz según el estudio acústico.

De todas las imágenes obtenidas por PIV de este caso, se escoge una muestra de 7 medidas en las que se aprecie claramente la posición de los vórtices, como la mostrada en la figura 6.7, en la que pueden observarse los vórtices a ambos lados de la salida de la tobera en rojo o azul en función del sentido de giro.

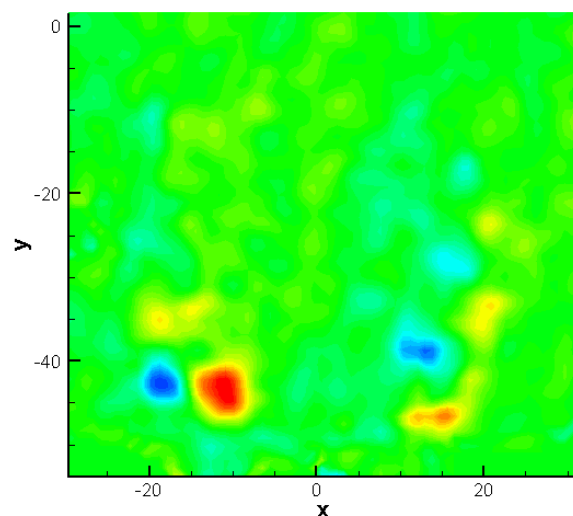


FIGURA 6.19: Ejemplo de arrollamiento de vórtices

La frecuencia queda definida de la siguiente forma:

$$f = \frac{V_y}{d} \quad (6.5)$$

Siendo  $d$  la distancia vertical entre los centros de dos vórtices de un mismo lado que giran en el mismo sentido y  $V_y$  la componente vertical de la velocidad del movimiento de los vórtices, que se supondrá igual a la velocidad de las partículas situadas en el punto medio entre los dos vórtices, en los que la influencia del resto de remolinos que giran en sentido contrario es lo más reducida posible.

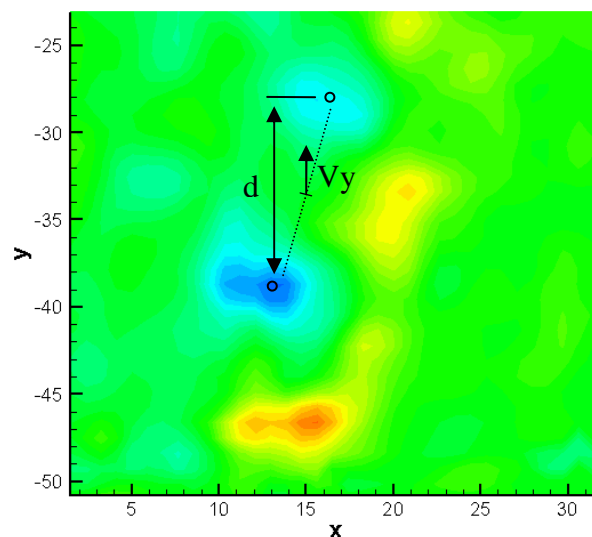


FIGURA 6.20: Representación de  $d$  y  $V_y$

Calculando  $f$  para los 7 casos y hallando la media, nos queda una frecuencia de 506,75 Hz.

$$\text{Por tanto} \quad \left\{ \begin{array}{l} f_{\text{acústica}} = 535 \text{ Hz} \\ f_{\text{PIV}} = 506,75 \text{ Hz} \end{array} \right.$$

Podemos entonces establecer que ambos experimentos son válidos, dada la similitud de resultados.



## *CAPÍTULO 7*

# CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

## 7.1 CONCLUSIONES

Este proyecto se ha centrado en el estudio de las inestabilidades de un quemador estabilizado por giro con un estudio acústico de las mismas y otro realizado por velocimetría por imágenes de partículas estereoscópica. Para ello, ha sido necesario, en primer lugar, una laboriosa documentación sobre la multitud de tecnologías contempladas en este proyecto, como quemadores estabilizados por giro, análisis acústicos, fundamentos y técnicas de PIV, equipos de laboratorio, seguridad y utilización del láser y teoría en ingeniería térmica y de fluidos.

El objetivo principal del proyecto era establecer un mapa de estabilidad del flujo para un amplio rango de condiciones de operación diferentes. Tras el análisis acústico se han establecido las condiciones de Swirl, de número de Reynolds, de relación de gastos máxicos, para las cuales el flujo presenta o no una estabilidad acústica.

El estudio mediante PIV estereoscópico ha permitido adquirir un conocimiento más amplio y preciso sobre el comportamiento del flujo. Por ello, y tras numerosas calibraciones de aparatos de medida, toma de imágenes, procesado de datos y análisis de los resultados obtenidos, se han identificado tres tipos distintos de flujos a la salida del quemador. Los tres tipos de flujos se distinguen principalmente por la existencia o no de una zona de recirculación. Cuando ésta existe, se distinguen dos regímenes de operación en función del ángulo de divergencia del flujo y de la posición y tamaño de la zona de recirculación. Esta zona de recirculación garantiza la estabilización de la llama a la salida de la tobera en caso de tratar con flujos reactivos. Con este punto, se ha cumplido uno de los principales objetivos del proyecto.

Además, y tras la comparación de ambos estudios, se ha logrado concluir que la presencia de picos acústicos marcados a determinadas frecuencias se debe a la generación de calles de torbellinos cuando el flujo se ve sometido a giros importantes.

## 7.2 *TRABAJOS FUTUROS*

Este proyecto abre puertas a futuras investigaciones. En primer lugar, a la de simulaciones fluido-dinámicas por ordenador del comportamiento del flujo con elementos finitos. La geometría relativamente sencilla del quemador utilizado en el laboratorio permite realizar esta tarea con relativa facilidad desde el punto de vista de la generación de una malla computacional. Más adelante, podrían compararse los resultados obtenidos en el presente proyecto con los obtenidos por simulaciones numéricas.

Otro de las posibles continuaciones de este proyecto sería un estudio exhaustivo del flujo reactivo, es decir, realizar un estudio con PIV estereoscópico del flujo con llama, en el que seguramente el flujo seguirá un patrón de comportamiento similar al analizado en este proyecto, pero en el que entrarán en juego nuevas variables y por tanto nuevas complicaciones. Estos posibles estudios serían de gran importancia para lograr llamas más estables y reducir en lo posible las emisiones de contaminantes.

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] Gupta A.K., Lilley D.G., Syred N., 1987, Swirl Flows, Ed. ABACUS PRESS.
- [2] Cheng R.K., 1998, Velocity and scalar characteristics of premixed turbulent flames stabilized by weak swirl. COMBUST
- [3] Cheng R.K. Yegian D.T., Misyasato M., Samuelsen G., Pelizzari R., Loftus P., Benson C., 2000, Scaling and development of low-swirl burners for low-emission furnaces and boilers.
- [3] LaVision FlowMaster. Advanced PIV system for Quantitative flow field análisis.
- [4] Fernández P., Mecánica de fluidos, Universidad de Cantabria.
- [5] Ormachea O.A., Diseño y construcción de un láser sólido pulsado del tipo YAG: Nd, Universidad Privada Boliviana.
- [6] Brizuela E., Romano S.D., Combustión. Facultad de ingeniería, Universidad de Buenos Aires, 2003.
- [7] Davis FlowMaster Software Manual for Davis 7.1, 2005.
- [8] Red Eléctrica Española < <http://www.ree.es/>>
- [9] Legrand M., 2008, Estudio y caracterización de un quemador estabilizado por giro. Tesis doctoral.
- [10] Abril A., 2007, Diseño y caracterización de una cámara de combustión estabilizada por Swirl mediante velocimetría por imagen de partículas (PIV), Proyecto fin de carrera.
- [11] Adrian R.J., 1991, Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics.
- [12] Rupérez M.J., Láseres: riesgos en su utilización. Centro Nacional de Nuevas Tecnologías.
- [13] Environmental Energy Technologies Division, Lawrence Berkeley National Lab. <<http://eetd.lbl.gov/aet/combustion/LSC-info/>>
- [14] The Energy Blog, <<http://thefraserdomain.typepad.com/energy/>>





- [15] Gupta A.K., Lewis M.J., Daures M. 2001. Swirl effects on combustion characteristics of premixed flames. The combustion Laboratory, Department of Mechanical Engineering, University of Maryland.
- [16] García I Vizcaino D., 2005, Sistema láser de medida de velocidad por efecto Doppler de bajo coste para aplicaciones industriales hidrodinámicas. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.
- [17] Raffel M., Willert C.E., Kompenhans J.. 2000. Particle Image Velocimetry