

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Marco histórico

La estimación de determinadas propiedades físicas de objetos lejanos, tales como su posición, tamaño, velocidad o temperatura, ha sido objeto de una enorme cantidad de trabajos de investigación. Desde la primera propuesta de G. Marconi en 1922, para utilizar las ondas electromagnéticas como sondas exploradoras, hasta nuestros días, la inspección remota de blancos se ha convertido en una área de gran interés y que ha dado lugar al desarrollo de muy diferentes tecnologías .

La irrupción del radar en la II Guerra Mundial supuso un salto tecnológico de gran trascendencia . Su fabricación fue posible gracias al desarrollo de dispositivos de generación y confinamiento de ondas electromagnéticas de muy alta frecuencia (magnetrón, guías de microondas, etc...). Sólo la utilización de señales de pequeña longitud de onda puede permitir concentrar en el espacio una potencia tal que su reflexión en retrodispersión en blancos lejanos pueda ser detectada.

A partir de aquí sus aplicaciones se extendieron más allá del ámbito militar, y pasaron al ámbito civil e industrial. Las bandas de radio utilizadas por los radares típicos depende del tipo de aplicación y alcance, comprendidas desde las bandas de onda corta (3-30MHz) para radares transhorizontes (OTH) de largo alcance (1000 millas náuticas), hasta los más típicos en la banda de las microondas, utilizadas en todas sus subdivisiones (nomenclatura utilizada por los aliados) desde los 2-4 GHz (banda L y S) en control de aproximación en aeropuertos y seguimiento de aviones, aplicaciones meteorológicas en banda C, en entornos industriales de corto alcance (banda X) y aplicaciones especiales (banda Ku, K y Ka) como el sistema de alunizaje de la misión APOLO, de muy corto alcance.

El año 1961, con la aparición del primer láser de onda continua, empieza a surgir nuevas ideas en el campo de la teledetección electromagnética. La tecnología radar inspiró el desarrollo de estas nuevas aplicaciones, ya que todas las propiedades básicas de las ondas de radio podían ser extrapoladas para el caso de fuentes de luz coherentes y monocromáticas para la detección de diferentes tipos de blancos.

La fuente o emisor de ondas electromagnéticas fue reemplazado por un láser, la antena por lentes y el receptor por fotodetectores (diodos PIN, fotodetectores de avalancha APD o por fotomultiplicadores PMT).

Una de las mejoras más relevantes obtenidas trabajando a frecuencias ópticas es la elevadísima ganancia de las antenas transmisoras y receptoras, utilizando aperturas de tamaño mucho más pequeño que en frecuencias de radio. El ancho del haz transmitido o divergencia del haz láser es mucho más pequeño que un haz electromagnético en bandas de radio [KD74][DK74]. Estas propiedades singulares de los haces láser marcan una profunda diferencia respecto a los sistemas basados en microondas, en relación a las características y propiedades de los blancos detectados, ya que con luz coherente podemos detectar una serie de fenómenos físicos que en la banda de microondas son totalmente invisibles, aumentando la precisión y resolución de las medidas.

Así, al cabo de sólo tres años de la aparición del láser de onda continua, los investigadores Yeh y Cummins [YC64] desarrollaron el primer prototipo de un medidor de velocidad o velocímetro láser, utilizando un láser y un conjunto de dispositivos ópticos, obteniendo resultados experimentales de la medida de la velocidad de agua circulando por un pequeño tubo. Un año más tarde Foreman [FGL65], utilizando esta nueva técnica, consigue medir la velocidad de un gas (aire).

Las diversas tecnologías disponibles incluyen tanto láseres de onda continua como láseres pulsados, de gas (CO<sub>2</sub>, HeNe, gases nobles, excímeros, etc.), de estado sólido (YAGs, YLFs, fibra dopada de erbio, etc.) o semiconductores, elegidos en función de la aplicación.

A esta nueva técnica, por similitud a los radares clásicos se le denomina sistema radar láser o LADAR (**LA**ser **D**etection **A**nd **R**anging) o más habitualmente sistema LIDAR (**LI**ght **D**etection **A**nd **R**anging). Pero el cambio no sólo fue frecuencial y por tanto, de la naturaleza de los dispositivos, sino también en cuanto a las nuevas aplicaciones que permitían utilizar estos nuevos sistemas en la banda óptica.

Las nuevas aplicaciones se demostraron muy numerosas. La posibilidad de detectar blancos extremadamente pequeños (del orden de las decenas de micra), con una alta precisión de las medidas y una gran resolución espacial y temporal, hizo posible abrir un nuevo campo de experimentación, como es la inspección de las rugosidades de un

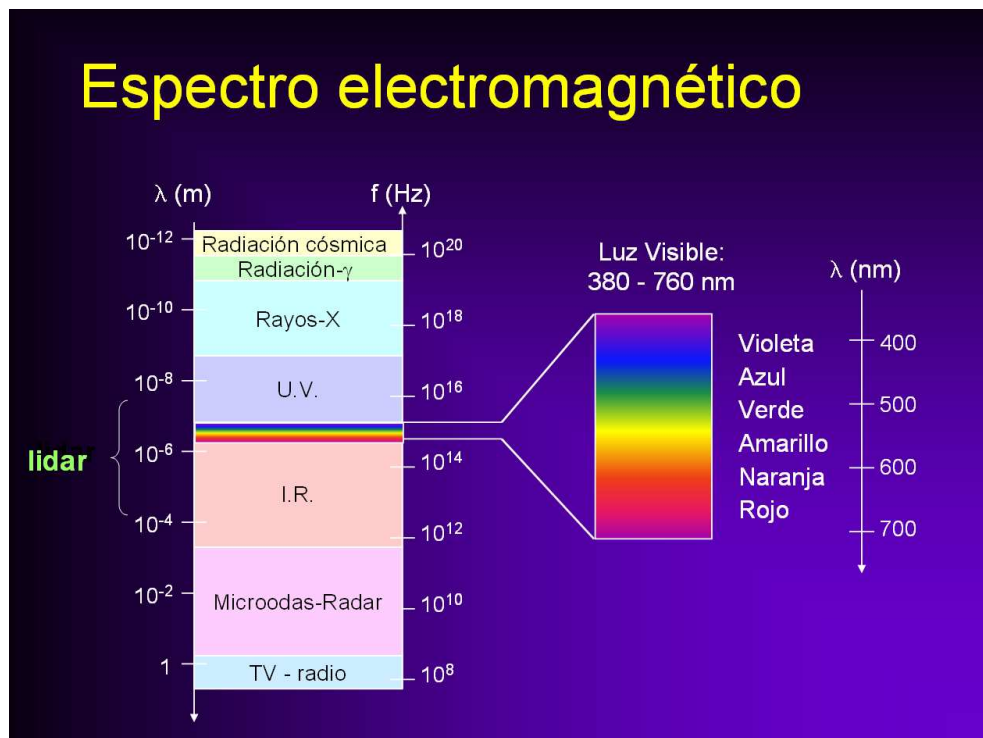


Figura 1.1 Espectro frecuencial

blanco sólido, pero sobre todo la estimación de diferentes características de diferentes tipos de fluidos, líquidos y gases (velocidad, temperatura, etc.). Además, con la gran ventaja que todas las medidas podían ser realizadas sin necesidad de introducir parte de la sonda de medida dentro del fluido (medidas no intrusivas), lo que previene cualquier tipo de distorsión del fluido.

## 1.2. Velocimetría Láser

Si nos ceñimos a uno de los parámetros más importantes en determinadas aplicaciones industriales como es el conocimiento de la velocidad de diferentes tipos de blancos, sólidos, líquidos y gases, durante las últimas tres décadas del siglo XX hasta nuestros días, aparecieron y continúan apareciendo diferentes sistemas de medida, todos basados en la detección a distancia mediante luz coherente, que las podemos enmarcar dentro de lo que se denomina genéricamente Velocimetría Láser (VL) [Bou99].

La VL es una técnica óptica utilizada principalmente para la detección de la velocidad de líquidos, gases y en procesos de combustión, en el marco de la mecánica de fluidos, campo de elevado interés por sus múltiples aplicaciones en la industria como podremos ver más adelante.

El conocimiento de la velocidad de un fluido, siempre que éste sea transparente a los haces láser y accesible desde el exterior, permite obtener un mejor conocimiento del comportamiento de éstos, y determinar la estructura y propiedades de las turbulencias en determinadas condiciones hidrodinámicas y aerodinámicas.

Hasta ese momento los científicos disponían de sensores mecánicos, de presión o magnéticos, aunque con una serie de inconvenientes y limitaciones muy importantes: poca precisión en las medidas, no aplicables en entornos de alta temperatura, aparatos que han de ser introducidos físicamente y generan distorsión en el propio fluido, poca resolución espacial y temporal, e imposibilidad de monitorizar cualquier fenómeno turbulento, con el añadido de la necesaria calibración de estos tipos de sensores. Por tanto, con la llegada de las técnicas ópticas, los científicos disponen de una nueva herramienta de medida que permite múltiples aplicaciones en la industria, abriendo un abanico de nuevas posibilidades.

Las diferentes técnicas de medida de velocidad mediante sistemas láser, pueden clasificarse globalmente en dos categorías, atendiendo a si la dispersión de energía se debe a las propias moléculas del fluido o a partículas trazadoras de sembrado. Por lo que respecta a los métodos más relevantes, se basan en tres principios, derivados en última instancia en la ecuación simple que nos relaciona la velocidad, el espacio y el tiempo: la medida del tiempo de vuelo, del espacio recorrido por el blanco, o la determinación de la velocidad a partir del efecto Doppler clásico.

Por lo que respecta a las técnicas de medida en función del tipo de blanco detectado, las podemos clasificar en dos:

- Los sistemas basados sobre la medida de energía dispersada directamente por las moléculas que forman el propio fluido (dispersión *Rayleigh*). Muy poco utilizados debido esencialmente a su falta de precisión y su pobre potencia dispersada, y por tanto se limitan a su uso para fluidos reactivos y sólo para velocidades muy elevadas.

- Los sistemas de medida basados en la detección de la dispersión de partículas de sembrado (generalmente se realiza el sembrado artificialmente) son los más utilizados (dispersión *Mie*). Esta solución aportó una mejora no solo en la precisión de las medidas, sino en el incremento espectacular de la energía dispersada y, por tanto, recibida por el fotodetector, lo que permite utilizar láseres de menor potencia. La única preocupación a tener en cuenta es la elección del sembrado. Los efectos de inercia de las partículas, problema importante puesto que puede degradar la calidad de las medidas y el grado de confianza en el caso de fluidos turbulentos, limitan la resolución temporal sino se cumple

con una serie de requisitos en función del tamaño del sembrado y de la velocidad del fluido.

La denominación de los sistemas de medida que utilizan fuentes láser depende del campo de utilización. Generalmente, cuando se utiliza para aplicaciones atmosféricas y para obtener información de diferentes parámetros, como la presencia de partículas en suspensión (aerosoles), humedad, temperatura, velocidad del viento, obtenida remotamente a partir de la radiación producida por fuentes ópticas de gran potencia (sistemas de onda continua) o energía (sistemas pulsados), a partir de la retrodispersión producida por la atmósfera, se les denomina sistemas Lidar.

Por lo que respecta a la detección de la velocidad de un blanco en el entorno de la ingeniería de la mecánica de fluidos, sea un líquido o un gas, usualmente se les denomina anemómetros láser Doppler o sistemas LDA (Laser Doppler Anemometry) o velocímetros láser Doppler o sistemas LDV (Láser Doppler Velocimetry).

Los sistemas LDV, que provienen de la palabra latina *velocitas* o velocidad, se utilizan de una manera genérica para cualquier tipo de blanco, mientras que los sistemas LDA, acrónimo formado por la palabra griega *anemos* o viento, son los empleados para la detección de la velocidad de gases (aplicaciones aerodinámicas) y líquidos (aplicaciones hidrodinámicas) o en procesos de combustión.

A pesar de todo, en los últimos años casi todos los investigadores utilizan la denominación LDA para cualquier tipo de blanco y aplicación, que no sea atmosférica. Aunque particularmente creemos no sea lo más recomendable, nosotros seguiremos con esta regla no escrita.

La velocidad de un blanco es un vector que está determinada por sus tres componentes. Existen diferentes dispositivos o configuraciones, que en función de las componentes detectadas, se clasifican de la siguiente manera:

- **1D-LDA:** Dispositivo que mide una sola componente de velocidad.
- **2D-LDA:** Dispositivo de medida que permite obtener simultáneamente dos de las tres componentes de velocidad, definidas en un plano.
- **3D-LDA:** Dispositivo que permite medir simultáneamente las tres componentes de velocidad (el vector de velocidad instantánea), lo que posibilita obtener una caracterización completa de cualquier turbulencia que pueda aparecer en el fluido.

Los diferentes tipos de velocímetros láser pueden ser clasificados en tres categorías:

### 1. Medida del tiempo (Tiempo de vuelo).

Si conocemos el tamaño de la zona de iluminada sobre el fluido y por ella atraviesa una partícula del sembrado, midiendo el tiempo que tarda en cruzar la zona de dispersión podemos obtener la velocidad del fluido. Estos tipos de velocímetros se conocen como LTA/LTV (Laser Transit Anemometer/Velocimeter) o L2F (Laser Two-Focus) [SF88]. Su principal inconveniente es una pobre precisión y la dificultad de obtener una buena caracterización de las turbulencias del fluido.

### 2. Medida del espacio.

Si conocemos el tiempo que transcurre entre dos posiciones diferentes de una partícula en movimiento, a partir de la iluminación del blanco por un láser pulsado y registrado en dos fotografías o imágenes consecutivas en esos dos instantes de tiempo, y midiendo la distancia entre imágenes de la partícula, podemos conocer su velocidad instantánea, no solo en un punto del fluido sino en un plano, obteniendo una muy buena visualización de la estructura y evolución del fluido, mediante procesado de imagen. A estos sistemas se denominan PIV (Particle Image Velocimetry)[RWK98] [Adr91]. En el caso que se necesite la tercera componente de velocidad, que debido a la geometría utilizada es totalmente indetectable, puede ser obtenida a partir de dos cámaras en configuración estereoscópica.

### 3. Medida del desplazamiento Doppler

Si tenemos un objeto (partícula) en movimiento cruzando la zona de medida o iluminación, el fenómeno Doppler aparece como un desplazamiento frecuencial en la energía dispersada por el blanco respecto a la frecuencia incidente, en el receptor. Midiendo esta desviación en frecuencia podemos obtener la velocidad del blanco fácilmente. Aunque parezca que esta forma de estimar la velocidad sea diferente a las dos anteriores, realmente se basa en los mismos principios. Si conocemos el tamaño de la zona de iluminación y la dividimos en pequeñas zonas o franjas de luz iguales y adyacentes, el paso de la partícula genera una variación periódica caracterizada por su frecuencia, proporcional a la velocidad del blanco. De esta manera convertimos el problema de estimar un tiempo o una distancia, en la detección de la frecuencia de un espectro, con la suposición de que la partícula mantiene la velocidad constante en toda la zona de iluminación. Si no es así, existen diferentes métodos de estimación que permiten extraer esa aceleración del fluido [BLT04].

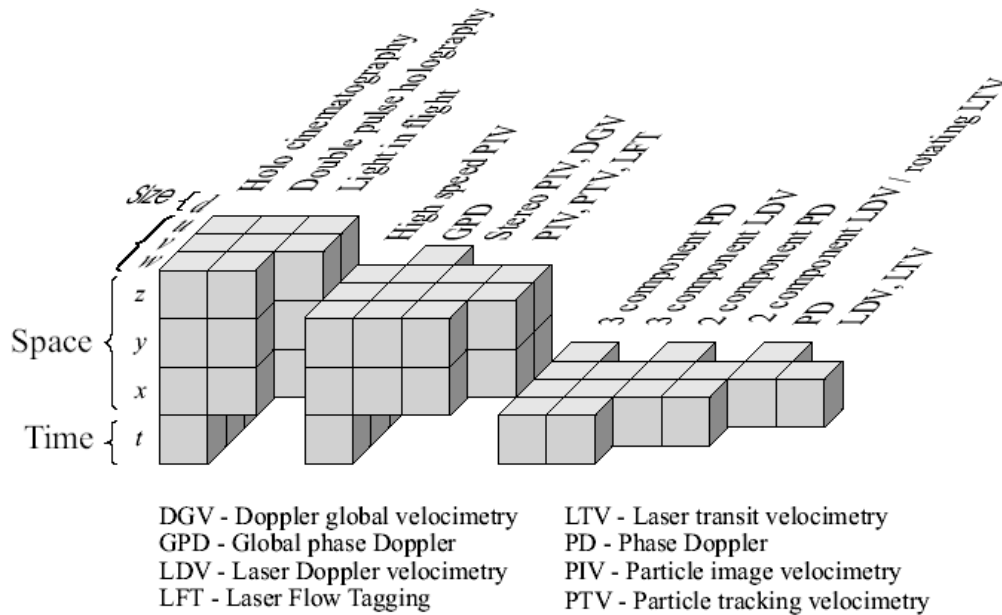
Los métodos de estimación de la frecuencia de la señal dispersada [ABDT03] por el blanco ha ido evolucionando a lo largo de la historia. En los primeros experimentos

se utilizaban analizadores de espectros analógicos, muy ineficientes pero capaces de visualizar evoluciones temporales de la velocidad. A partir de 1971 se utiliza los circuitos PLL (Phase Locked Loop), mejorando la detección para pobres SNR, en fluidos que generen gran cantidad de datos (líquidos)[DS25]. A partir de los años 80 y 90 aparecen diferentes soluciones: Utilización de contadores temporales (cruces por cero) [DT84] que permiten un mayor ancho de banda aunque requieren altos valores de SNR, o, actualmente, mediante estimadores espectrales en tiempo real (a partir de la densidad espectral de potencia utilizando el algoritmo de la transformada rápida de Fourier (FFT))[Lad87] [MC87] [IB92], óptimo para SNR muy bajas, o mediante métodos similares a partir de técnicas de correlación [Jen92] o covarianza de los datos [LA88] y últimamente con estimadores paramétricos [Nob99], como lo más innovador.

En función del proceso de estimación utilizado para hallar la frecuencia Doppler, aparecen diferentes técnicas:

- a) Medir directamente la frecuencia mediante dispositivos ópticos (velocimetría por espectrometría óptica). Utilizada solo en fluidos transitorios de alta velocidad [JP70].
- b) Obtener la frecuencia a partir de la mezcla de la señal desplazada con una muestra de la señal incidente o de referencia (velocimetría de Haz de referencia) [YC64]. Utilizado en la detección de blancos sólidos.
- c) Utilizando dos haces incidentes de luz, y mezclando sus señales dispersadas en diferentes direcciones (Velocimetría de franjas o Diferencial Doppler) [SP69] [Pen69]. Este es el sistema más utilizado por diferentes motivos: es independiente de la dirección de observación y obtiene la mejor SNR, es decir óptimo en el caso de líquidos y gases.

En la figura 1.2, presentamos las diferentes técnicas actualmente más utilizadas en la medida de la velocidad de blancos mediante fuentes láser [ABDT03], indicando para cada una de ellas el número de componentes de la velocidad que permiten medir (u,v,w), en qué dimensiones espaciales pueden realizar medidas (x,y,z), y si son capaces de obtener evoluciones temporales (t). Además, incluimos otra parámetro o característica del blanco como puede ser el tamaño de las partículas inmersas en el fluido (d).



**Figura 1.2** Técnicas de medida por láser más utilizadas actualmente [ABDT03]

### 1.3. Aplicaciones

La medida de la velocidad de líquidos y gases mediante un sistema LDA en sus diferentes configuraciones, permite múltiples aplicaciones en diferentes entornos de la industria. Las principales son:

#### Verificación de modelos teóricos en fluidos

El conocimiento de la velocidad y turbulencias de un fluido, actualmente se puede modelar teóricamente a partir de eficientes códigos computacionales de simulación (CFD)<sup>1</sup>. Un sistema LDA permite a los científicos validar y comprobar estos códigos de una manera sencilla, debido al amplio rango de velocidades detectadas, por su alta resolución temporal y espacial, y por su gran precisión en la medida de la velocidad.

#### Velocidad y vibraciones de superficies rugosas

Permite controlar y monitorizar de una manera eficaz procesos industriales que incluyan el desplazamiento lineal, rotación de piezas, y vibraciones [CM02].

<sup>1</sup>CFD: Computational Fluid Dynamics



### Aplicaciones en biomedicina

Estudio de la sangre en arterias, venas y capilares en diferentes órganos humanas [SKPW<sup>+</sup>93] o animales [MOC90], y la detección de plasma o células rojas [Kol85].

### Experimentos Aerodinámicos

En la industria muchos experimentos aerodinámicos permiten optimizar el diseño, fabricación y construcción de automóviles, aviones o helicópteros, para reducir su resistencia al viento, minimizar el consumo de energía o hasta aumentar la eficiencia de sistemas de calefacción en los compartimientos de los pasajeros [BDL99].

### Experimentos Hidrodinámicos

Permiten a la industria optimizar la construcción y diseño de cualquier mecanismo inmerso en un fluido: en canales de experimentación es posible el conocimiento del proceso de transporte de sedimentos, la caracterización de fenómenos de mezcla, diseño del casco de buques, eficiencia de propulsión y reducción de contaminantes de motores, modelización del oleaje en ríos, mares o canales artificiales, o funcionamiento de bombas [LM89][AB88].

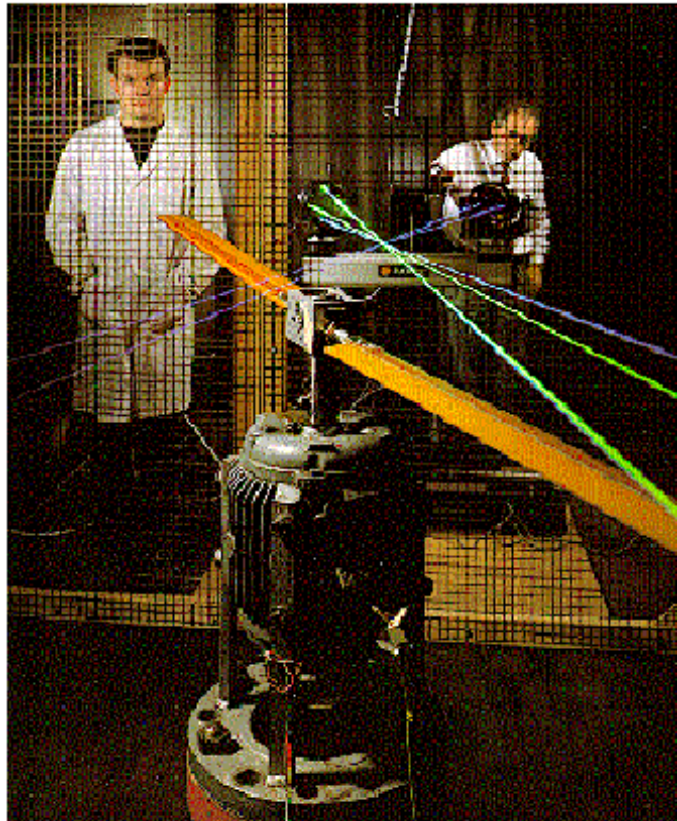
### Procesos de combustión

Los sistemas LDA permiten medir en entornos de alta temperatura o altamente peligrosos. En procesos de combustión se utiliza para reducir las emisiones de gases nocivos, eficiencia de hornos o calderas, quemadores y estufas [FSJ90].

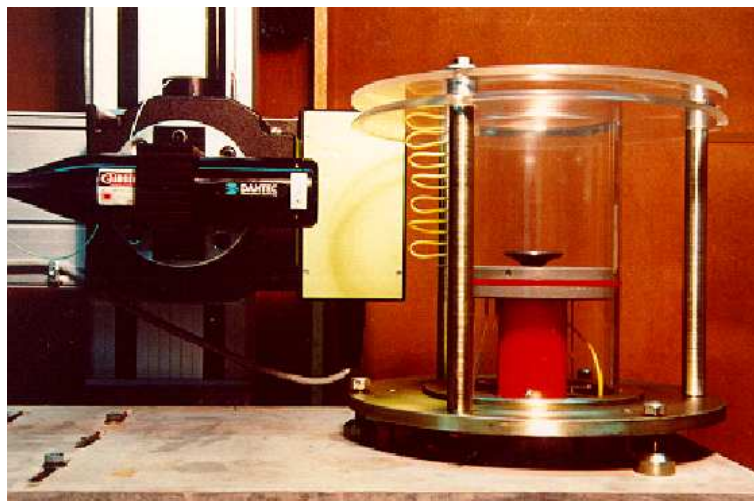
La empresa Dantec [Dyn02a] empresa líder en el mercado de sistemas de medida basados en láser, recoge en su catálogo diferentes imágenes de las aplicaciones más utilizadas en la industria.

En la figura 1.3 presentamos la medida aerodinámica en un túnel de viento de un rotor de helicóptero (Universidad de Bristol, UK), el comportamiento de una válvula en la figura 1.4 (Westsächsische Hochschule Zwickau, Germany), y de la medida del perfil aerodinámico de un automóvil (figura 1.5) (Mercedes-Benz, Germany) o de un barco a escala (figura 1.7) (Universidad de Bristol, UK).

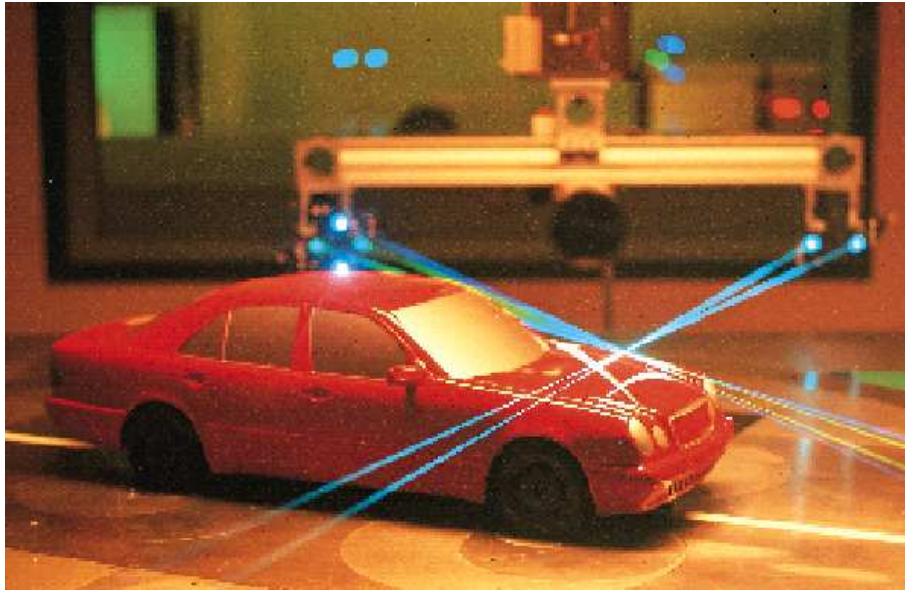
También podemos observar en la figura 1.7 la medida dentro de una bomba (Grundfos A/S, DK) y de las turbulencias provocadas por las hélices de un motor de un barco (figura 1.8).



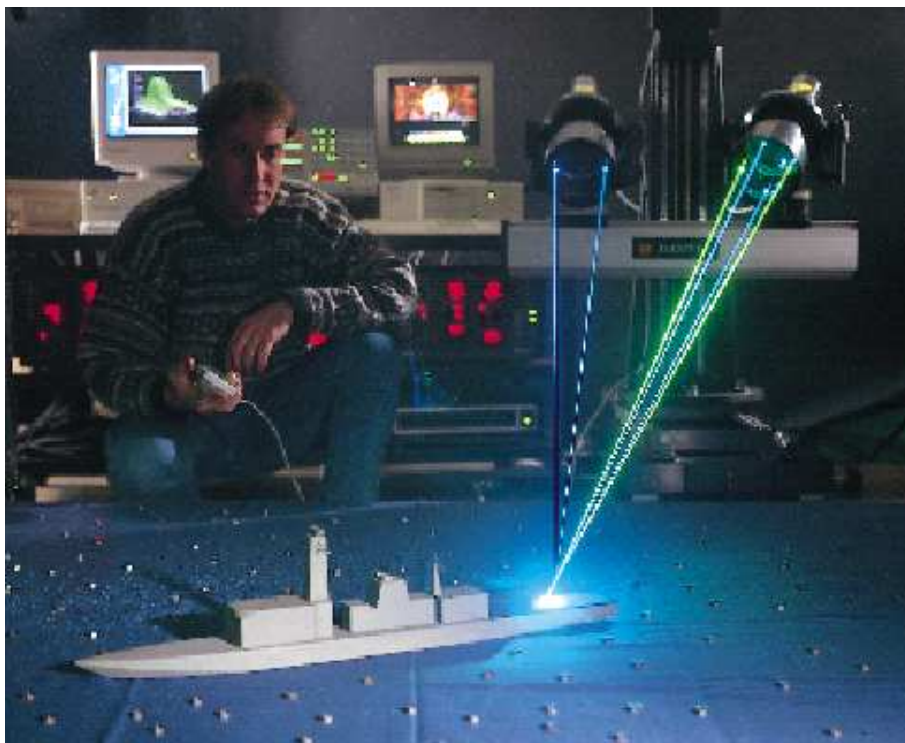
**Figura 1.3** Caracterización de un rotor de helicóptero en un túnel de viento [Dyn02a]



**Figura 1.4** Caracterización de una válvula [Dyn02a]



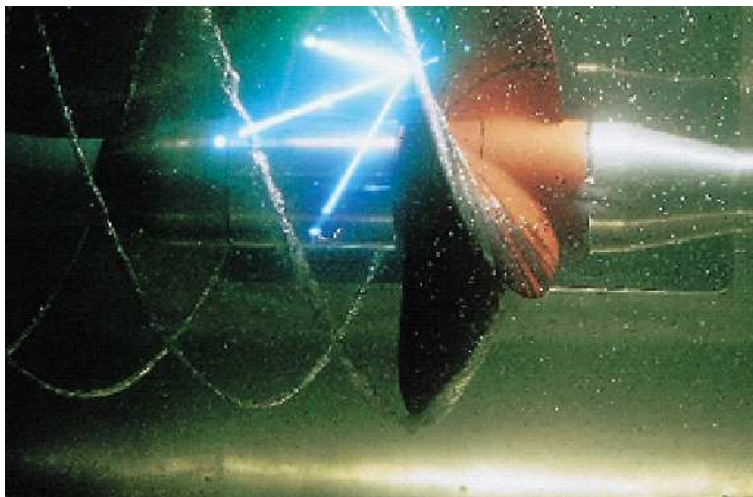
**Figura 1.5** Estudio del perfil de un automóvil a escala en un túnel de viento [Dyn02a]



**Figura 1.6** Estudio aerodinámico de un barco a escala en un túnel de viento [Dyn02a]



**Figura 1.7** Fotografía de la caracterización de una bomba de agua [Dyn02a]



**Figura 1.8** Caracterización de las turbulencias de las hélices de un barco en un canal hidrodinámico [Dyn02a]

## 1.4. Motivación

En el grupo de investigación d'Enginyeria electromagnètica i Fotònica (EEF) del Departamento de Teoria del Senyal i Comunicacions de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), se están desarrollando diferentes sistemas de medida, en el área de la teledetección con fuentes láser, para diferentes campos de aplicación: Un Sistema Lidar, para el sondeo activo de la atmósfera [Roc96], que constituye una potente herramienta en aplicaciones medioambientales, meteorológicas y de estudio del clima, y de dos diferentes velocímetros láser o LDV; un sistema radar láser homodino [Rod98] [RGVCD00][RGV00] [RCGV01], y un sistema radar láser heterodino [GVR00] [GVR02], para la detección y estimación de la velocidad de superficies rugosas de blancos sólidos de baja potencia, para aplicaciones industriales y de control de tráfico.

El equipo de investigación, en colaboración con el Laboratorio de Ingeniería Marítima de la UPC y la empresa MONOCROM S. L, desarrolló un primer prototipo de velocímetro láser para la medida de una componente de la velocidad en fluidos y superficies rugosas de un blanco sólido, de prestaciones, tamaño y precio adecuados a su utilización en entornos hidrodinámicos, capaz de medir velocidades de hasta 3m/s (velocidades típicas en canales de experimentación).

Este sistema consta de tres partes bien diferenciadas:

1. El subsistema óptico, de emisión-recepción, diseñada por nuestro grupo de investigación y encargada su realización a la empresa MONOCRON S.L.
2. El subsistema electrónico de demodulación, acondicionamiento y pre-procesado de la señal.
3. La unidad de procesado y presentación de resultados.

Las dos últimas fueron diseñadas y realizadas por el equipo de investigación.

El prototipo fue probado en laboratorio y mostró su capacidad para medir velocidades tanto de fluidos como de sólidos, con buenas prestaciones. Las características principales son:

1. **Baja potencia óptica.** Utiliza un diodo láser de Philips @670nm 30mW de potencia nominal. Se utiliza el esquema diferencial de dos haces de prueba. Al final del proceso de focalización, división de haz y desviación en frecuencia mediante un modulador acusto-óptico (AOM) sólo la cuarta parte de la potencia puede ser aprovechada, suficiente para la detección posterior.

2. **Capacidad de medir la velocidad en puntos del fluido en movimiento.** Se realizaron medidas de la velocidad del agua impulsada por una pequeña bomba circulando a lo largo de una tubería, a través de una pequeña ventana de metacrilato practicada en el conducto. Excepcionalmente se lograron medidas con agua de red sin necesidad de utilizar partículas adicionales de sembrado (*seeding particles*).
3. **Capacidad de medir flujos reversibles.** Este sistema permite detectar no solo la velocidad de movimiento del fluido (de las partículas en movimiento), sino también el sentido de movimiento del fluido, gracias al desplazamiento en frecuencia aplicado a uno de los haces de prueba con el modulador acusto-óptico (AOM).
4. **Portátil y robusto.** La sonda incorpora el propio diodo láser. Tiene dimensiones reducidas y no ha sufrido desalineamientos a pesar de que los dos haces de prueba se juntan en un punto de menos de 80 micras de diámetro, y la lente receptora concentra la radiación recogida desde el volumen de medida en el extremo de una fibra de 50 micras de diámetro en su núcleo.
5. **Software de adquisición y presentación de datos.** El sistema trabaja en tiempo real, realizando 10 medidas por segundo actualmente, utilizándose Lab-View en Windows, obteniendo una precisión en la medida de la velocidad menor entre el 2-3 %.

Las diferentes empresas que disponen de sistemas de medida basados en las tecnologías LDA, incluyen anemómetros Láser Doppler (LDA) capaces de detectar más de una componente de velocidad.

En el caso de sistemas 2D-LDA, el elevado coste, complejidad y altas potencias utilizadas de los láseres (uso de propósito general) hace que nos planteemos la necesidad de desarrollar nuevos prototipos que minimicen los costes del sistema, más económicos, que simplifiquen los montajes y nos permitan disponer de sistemas mucho más adhoc, en función del tipo de aplicación. Además, todos estos sistemas comerciales, utilizan más de una fuente láser, más de un detector y de procesadores específicos (DSP<sup>2</sup>) para la obtención de la estimación de los resultados.

Hoy en día, sin perder esencialmente las principales prestaciones de los sistemas comerciales actuales, la alta velocidad y capacidad de cálculo de los ordenadores perso-

---

<sup>2</sup>Procesadores digitales de señal

nales actuales debe hacer innecesaria la inclusión de procesadores específicos para estos equipos de medida, mucho más caros y difíciles de controlar.

## 1.5. Objetivos

El objetivo de este trabajo es la realización y optimización de un sistema LDA-LDV (Laser Doppler Anemometry - Laser Doppler Velocimetry), portátil y de bajo coste, que pueda ser utilizado en diferentes entornos de experimentación hidrodinámica e industriales.

Se trata de realizar un nuevo prototipo, como continuación del sistema LDA ya existente de una dimensión (una componente de velocidad), utilizando la misma técnica diferencial o de franjas, pero que sea capaz de detectar dos componentes de la velocidad a partir de tres haces láser simétricos, de un fluido o blanco sólido denominado Sistema 2D-LDA (dos componentes de la velocidad), en configuración *backscattering* o retrodispersión (RD) y *forward scattering* o detección hacia delante (DHD), y optimizar la parte de adquisición y procesado.

La realización completa del sistema requiere el diseño de la óptica de emisión y recepción, la electrónica auxiliar y el subsistema de procesado, buscando un buen equilibrio entre calidad y coste de los equipos de acuerdo con las especificaciones de partida. Se contemplan de antemano dos aplicaciones principales:

1. Sistema de medida de la velocidad de fluidos en canales y tanques de experimentación hidrodinámica. Se pretenden medir dos componentes de la velocidad, de forma no intrusiva, en diferentes puntos del fluido bajo estudio.
2. Para la detección y medida de la velocidad de superficies, basado en la detección de desplazamientos Doppler de la señal retrodispersada por el blanco.

Para ello, se pretende alcanzar los siguientes objetivos:

- ✓ Bajo potencia y coste.
- ✓ Generación de tres haces a partir de una única fuente láser de Nd:LSB a 532nm (a estudio).
- ✓ Detección de dos componentes de velocidad del fluido ( $V_{\text{máx}} = 3\text{m/s}$ ).

- ✓ Utilización de un solo fotodetector.
- ✓ Sistema sensible al sentido de las dos velocidades.
- ✓ Error máximo en la velocidad del 1 %.
- ✓ Sistema de adquisición de señal automatizado mediante una tarjeta de adquisición de datos controlado por un PC.
- ✓ Software de adquisición, control y presentación de datos a tiempo real, rápido y eficiente.
- ✓ Análisis espectral óptimo de la señal recibida, mediante la estimación de la densidad espectral de potencia a partir de la transformada rápida de Fourier (FFT).
- ✓ Optimización de la señal recibida seleccionando aquellas partes de señal mejores para el posterior análisis espectral, mediante la inclusión de umbrales de control.
- ✓ Realizar campaña de medidas de diferentes tipos de blancos (sólidos y líquidos).
- ✓ Caracterización y estudio teórico de la relación señal a ruido (SNR) a la salida del módulo fotodetector del sistema 2D-LDA.

De los tres módulos o partes del sistema 2D-LDA, podemos citar las principales tareas que se contemplan:

#### 1. Subsistema Óptico:

Obtención de los parámetros de diseño más adecuados para toda la parte óptica, en función de la configuración elegida (sonda). Elección de la frecuencia del láser y potencia, especificaciones de la óptica a utilizar, frecuencias de los desplazadores de los moduladores acusto-ópticos.

En esta tesis, se implementará toda este subsistema en un mesa óptica en el laboratorio de óptica integrada, para verificar el montaje, realizar experimentos y comprobar su total funcionalidad. Verificados los resultados y la viabilidad del prototipo, entraríamos en una segunda fase de integración en un cabezal óptico de tamaño lo más reducido posible, objetivo no planteado en esta tesis.



## 2. Subsistema electrónico:

Las principales funciones que debe realizar este bloque son la siguientes:

- a) Etapa de transimpedancia y pre-amplificación a la frecuencia de trabajo
- b) Demodular la señal Doppler a una frecuencia intermedia, para que la tarjeta de adquisición de datos pueda digitalizarla
- c) Ajustar la amplitud de la señal en el margen de tensión de entrada, de manera, que se puedan obtener con mayor precisión sus frecuencias
- d) generar un pulso (o como veremos hasta una máximo de cuatro) cada vez que la señal supera unos niveles de tensión prefijados, indicando a la tarjeta el momento preciso en que debe iniciar el muestreo de la señal.

## 3. Subsistema de adquisición y procesado digital:

El subsistema procesador digital se encargará de realizar los siguientes procesos:

- a) Digitalizar la señal Doppler.
- b) Realizar una interpolación de las muestras por medio de la técnica del *zero-padding*.
- c) Calcular la FFT de la señal y obtener la densidad espectral de potencia.
- d) Buscar los máximos relativos en el espectro de frecuencias y interpolar mediante técnicas que mejoren la precisión.
- e) Calcular los desplazamientos Doppler y las componentes de la velocidad.
- f) Visualizar los resultados.

## 1.6. Estructura del documento

Este documento, reflejo de la investigación realizada durante unos cuantos años, la podemos dividir en dos partes, la experimental (desarrollo práctico del prototipo) y la teórica (incluyendo cálculo numérico).

La parte experimental empieza en el capítulo 2, con una introducción de las diferentes técnicas láser Doppler que permiten detectar la velocidad de diferentes blancos.

En el capítulo 3, se explican los principios básicos de la técnica que se emplea en este trabajo, la denominada técnica Diferencial Doppler.

En el capítulo 4 se presenta el prototipo del sistema 2D-LDA diseñado, y núcleo de la investigación. En él, se desarrollan los tres subsistemas que forman el prototipo:

La parte óptica o subsistema óptico (SOP), encargada de sondear el blanco; la parte electrónica denominada Subsistema electrónico (SEL), formada por diferentes circuitos electrónicos de amplificación, filtrado, mezcla y de generación de señales de disparo y, por último, el subsistema de adquisición y procesado digital (SAPD), integrado por una placa de adquisición, un ordenador personal (PC) y un software de control, para la estimación espectral y presentación de datos.

Antes de las medidas, en el capítulo 5 se resumen los criterios que deben satisfacerse a fin de elegir las partículas de sembrado, que son necesarias para estimar la velocidad de un fluido.

Las medidas reales realizadas en el laboratorio de óptica integrada del grupo de investigación EEF, se presentan en el capítulo 6, para dos casos particulares. El primero es para un blanco sólido rotatorio, y el segundo es un líquido (agua) circulando por el interior de un tubo de plástico, impulsado por una pequeña bomba.

La parte de formulación teórica, permite realizar simulaciones para poder calcular la relación señal a ruido (SNR) de un sistema 2D-LDA utilizando la configuración del prototipo implementado.

En el capítulo 7 se hace un breve resumen de los diferentes mecanismos de dispersión que se producen cuando un haz de luz incide sobre una partícula. Posteriormente, a partir de la geometría de los haces del sistema, calculamos la SNR teórica a la salida del detector óptico, en función del tamaño de las partículas, las características del fotodetector y el tamaño de la apertura receptora.

En los anexos A y B del documento adjuntamos desarrollos matemáticos de diferentes ecuaciones que permiten clarificar conceptos básicos de la intensidad dispersada por un sistema LDA de una dimensión y para la configuración 2D-LDA de tres haces, y en el anexo C las expresiones de los vectores de propagación y polarización en el caso que los haces estén colocados sobre el eje  $X$ .

Aunque no es imprescindible, hemos creído oportuno añadir en el anexo D las especificaciones del láser y de los equipos de medida utilizados; del medidor de potencia óptica y del analizador de espectros, juntamente con las características técnicas de los diferentes componentes ópticos (anexo E), del fotodetector APD y el módulo preamplificador (anexo F), y de los componentes electrónicos (anexo G).

Para finalizar, en el anexo H se presentan las vistas de los diferentes montajes del subsistema electrónico que hemos diseñado y montado.