



## **Sensor fotónico para la caracterización física y química de flujos multifase**

**Eduardo Valero Huerta**

**Tutor: Roberto Llorente Sáez**

**Cotutor: Maria Morant Pérez**

Trabajo Fin de Grado presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Graduado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

Curso 2016-17

Valencia, 11 de Septiembre de 2017

# Agradecimientos

Me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres por su inestimable apoyo, a mi hermano por inspirarme con su esfuerzo y sacrificio, por ser un gran ejemplo a seguir.

Asimismo, agradezco a mis compañeros del Centro de Tecnología Nanofotónica por su apoyo. A Roberto Llorente, por su confianza en mí y darme la oportunidad de realizar este trabajo. A Maria Morant, por su paciencia y consejos. A Sergio Carrasco por toda su ayuda y dedicación.

También quisiera expresar mi gratitud al equipo del Laboratorio de Hidráulica y Obras Hidráulicas por su colaboración.

# Resumen

Este Trabajo Final de Grado tiene como objetivo principal la investigación, análisis y desarrollo de una tecnología fotónica para la detección y caracterización físico-química de partículas en suspensión en flujos multifase agua-aire. Esta tecnología tiene aplicación en instalaciones de generación eléctrica hidráulica, ya que una completa caracterización del flujo multifase permite una mejor gestión de sus estructuras de desagüe. Además, la caracterización de compuestos químicos propuesta en este trabajo también tiene aplicaciones biomédicas.

En este trabajo se proponen diferentes técnicas fotónicas para la caracterización de flujos multifase utilizando un láser óptico como componente principal y algoritmos de procesamiento digital asociados. La iluminación y detección láser permite identificar y caracterizar burbujas presentes en el flujo. Con los algoritmos de procesamiento digital desarrollados en este trabajo es posible determinar la velocidad de burbujas mediante estimación de movimiento.

Además, en este trabajo se propone un sensor fotónico capaz de detectar la presencia de aire en el agua u otros disolventes en un medio mediante el cálculo del ángulo límite de la propagación de un haz láser dentro de un prisma. Este sensor es capaz de detectar e identificar la muestra ya que la determinación del ángulo crítico depende del índice de refracción de cada compuesto químico.

En esta memoria, además, se incluye el estudio del estado del arte de diferentes técnicas de caracterización de flujos incluyendo técnicas optoelectrónicas y acústicas. Se describen los principios fotónicos sobre los que se basa cada una de las técnicas propuestas junto con los resultados experimentales más relevantes obtenidos para cada caso. Finalmente, la memoria resume las conclusiones alcanzadas con este trabajo, las publicaciones asociadas y las líneas abiertas para la investigación futura.

# Resum

Aquest Treball Final de Grau té com a objectiu principal la investigació, anàlisi i desenvolupament d'una tecnologia fotònica per a la detecció i caracterització físico-química de partícules en suspensió en fluxos multifàsics aigua-aire. Aquestes tècniques tenen aplicació en instal·lacions de generació elèctrica hidràulica, ja que una completa caracterització del flux multifàsic permet gestionar els seus òrgans de desguàs de manera més eficient. A més a més, la detecció i identificació de compostos químics presents en el flux que es proposa en aquest treball també té aplicacions biomèdiques.

En aquest estudi es proposen diferents tècniques fotòniques per a la caracterització de fluxos multifàsics utilitzant un làser com a component principal i els algorismes de processament digital associat. La il·luminació i detecció làser permet determinar la velocitat de bombolles presents en el flux. Amb els algorismes de processament desenrotllats en aquest treball és possible determinar la velocitat de bombolles mitjançant tècniques d'estimació de moviment.

A més a més, en aquest treball es proposa un sensor fotònic capaç de detectar la presència d'aire en l'aigua o altres dissolvents en un medi mitjançant el càlcul de l'angle límit en l'interior d'un prisma. Aquest sensor és capaç d'identificar el tipus de mostra, ja que la determinació de l'angle crític depèn de l'índex de refracció de cada compost químic.

En aquesta memòria s'inclou una revisió de l'estat de l'art de diferents tècniques de caracterització de fluxos incloent tècniques optoelectròniques i acústiques. Seguidament, es descriu els principis fotònics utilitzats en cada una de les tècniques proposades, els algorismes de processament desenrotllats i els resultats experimentals més rellevants obtinguts per a cada cas. Finalment, es resumeixen les conclusions que s'han arribat amb aquest treball, les publicacions associades i les línies obertes per a investigació futura.

# Abstract

The main topic of this Final Grade Work is the evaluation, analysis and development of photonic technologies for the detection and physical-chemical characterization of particles that are present in multi-phase air-water flows. These techniques find application in hydroelectric power plants since a complete characterization of the multi-phase flow enables a more efficient management of the resources. Furthermore, the optical techniques proposed in this work for the detection and identification of chemical compounds have biomedical applications.

In this study, different photonic techniques are proposed for the characterization of multi-phase flows combining optical laser illumination with proper digital signal processing. On one hand, it is possible to calculate the velocity of bubbles illuminating the multi-phase flow with an optical laser and the algorithms developed by means of movement estimation techniques.

In addition, optical laser propagation enables the detection of particles of air in water or other components present in the flow by calculation of the critical angle inside a prism. We are able to detect and identify different chemical compounds present in the flow through the estimation of the critical angle, which depends on the refractive index of each chemical compound.

In this document, an overview of the state-of-the-art of different techniques currently available for multi-phase flow characterization is reported including both optoelectronic and acoustic techniques. Following this study, the photonic principles employed in each of the optical techniques proposed in this work are described in detail, including the associated digital signal algorithms developed for data processing and the experimental results obtained in each case. Finally, the conclusions reached in this work, the associated publications and the lines of research opened are summarized.



# Índice

Capítulo 1. Introducción .....	1
1.1 Objetivos .....	1
1.2 Metodología .....	2
1.2.1 Plan de trabajo.....	2
1.2.2 Cronograma.....	4
Capítulo 2. Análisis del estado del arte para la detección y caracterización de burbujas ....	6
2.1 Técnicas acústicas .....	7
2.2 Técnicas optoelectrónicas.....	8
Capítulo 3. Tecnología propuesta y comparación con el estado del arte .....	10
3.1 Resumen de ventajas e inconvenientes .....	11
Capítulo 4. Técnica A: Cálculo de la velocidad de burbujas en flujos multifase mediante iluminación láser y procesado digital.....	12
4.1 Principio óptico .....	12
4.1.1 Descripción sensor CMOS .....	12
4.1.2 Iluminación óptica.....	13
4.1.3 Lente plástica sintonizable .....	14
4.2 Algoritmos de cálculo de velocidad .....	15
4.2.1 Método Optical Flow .....	16
4.2.2 Método SIFT .....	16
4.2.3 Método SURF .....	17
4.2.4 Método BIV.....	18
4.3 Demostración experimental.....	18
4.3.1 Montajes de laboratorio.....	18
4.3.2 Caracterización física de las burbujas .....	19
4.3.3 Comparativa de algoritmos de cálculo de velocidad.....	20
4.3.4 Resultados experimentales del cálculo de velocidad en columna de agua.....	22
4.3.5 Resultados experimentales del cálculo de velocidad en flujos supercríticos ..	23
4.4 Discusión de resultados .....	26
Capítulo 5. Técnica B: identificación de partículas mediante determinación del ángulo crítico	27
5.1 Principios fotónicos de propagación láser.....	27
5.1.1 Ley de Snell.....	27
5.1.2 Ley de Fresnel .....	28
5.1.3 Ángulo crítico.....	29
5.1.4 Reflexión total interna.....	29
5.1.5 Efecto Goos-Hänchen .....	30

5.2	Estudio ángulo crítico de un haz láser interactuando con diferentes sustancias ....	30
5.2.1	Software de simulación .....	30
5.2.2	Modelo electromagnético para propagación de ondas .....	30
5.2.3	Resultados de simulación .....	31
5.3	Demostración experimental.....	32
5.3.1	Montaje de laboratorio .....	33
5.3.2	Desarrollo de algoritmos para el cálculo del índice de refracción .....	37
5.3.3	Resultados experimentales .....	42
5.4	Estudio de integración del sensor.....	47
5.4.1	Colimación del haz láser y sensibilidad de variación del ángulo .....	47
5.5	Discusión de resultados obtenidos .....	48
Capítulo 6.	Conclusiones .....	49
6.1	Publicaciones asociadas a los resultados de este trabajo.....	49
6.2	Líneas abiertas y pasos siguientes .....	50
	Referencias.....	52
	Abreviaturas y acrónimos .....	58
	Anexos .....	59
	Anexo A. Índices de refracción de las muestras estudiadas.....	59
	Anexo B. Caracterización de flujos emulsionados en estructuras hidráulicas mediante tecnología fotónica .....	60
	Anexo C. Photonic Sensing and Characterization of Multiphase Water Flows.....	61
	Anexo D. Diluted Chemical Identification by Total Internal Reflection Photonic Sensing .....	62

## Índice de figuras

Figura 1: Cronograma de tareas seguido en este TFG. ....	5
Figura 2: Daño por cavitación en el órgano de desagüe de la presa de Glen Canyon, EEUU en 1983 [4]. El agujero tiene una profundidad de 11m. ....	6
Figura 3: Espectro de potencia acústica producido por cavitación generada mediante una varilla agitadora (Donald [13]). ....	7
Figura 4: Ruido en una turbina Francis producido con y sin presencia de cavitación [15]. ....	8
Figura 5: (a) Montaje experimental para detección de burbujas mediante BPD [21]; (b) simulación de la región de detección necesaria para una burbuja de 5 mm. ....	9
Figura 6: Principio esquemático para determinar el tamaño de las burbujas y la velocidad mediante el uso de dos sondas ópticas [22]. ....	9
Figura 7: Diagrama de los componentes del sensor propuesto. ....	12
Figura 8: Eficiencia cuántica del sensor CMOS On Semi Python 1300 [38]. ....	13
Figura 9: Imágenes capturadas con 38.8 fps y tiempo de exposición de 216 $\mu$ s en un flujo multifase aire-agua a 3.9 m/s: (a) Sin iluminación; (b) con iluminación con láser verde; (c) con iluminación solo con focos LED en dirección perpendicular a la dirección del flujo; (d) iluminación con láser verde y focos LED. ....	14
Figura 10: (a) Potencia focal en función de la intensidad proporcionada a la lente; (b) programa de control. ....	15
Figura 11: Representación visual de una pirámide de 3 niveles. ....	16
Figura 12: (a) Sensor para el cálculo de velocidad, (b) montaje en los laboratorios UPV-NTC para la caracterización física de columna de agua. ....	19
Figura 13: (a) Montaje experimental en el canal supercrítico de los laboratorios UPV-IIAMA; (b) Ejemplo de adquisición de imágenes del sensor. ....	19
Figura 14: Fotograma en los laboratorios UPV-NTC antes del procesado y tras el procesado. ....	20
Figura 15: Estimación del flujo óptico en un fotograma capturado con burbujas generadas con un dispersor de aire en los laboratorios UPV-NTC. ....	21
Figura 16: Correspondencias detectadas mediante el método SIFT entre dos fotogramas con el dispersor de aire de los laboratorios de UPV-NTC. ....	21
Figura 17: Correspondencias detectadas mediante el método SURF entre dos fotogramas de un flujo multifase generado con el dispersor de aire en los laboratorios UPV-NTC. ....	21
Figura 18: Velocidades obtenidas mediante método BIV con el sensor óptico propuesto en columna de agua generada con difusor de burbujas en los laboratorios NTC-UPV. ....	22
Figura 19: Histograma de velocidades calculado con diferentes algoritmos y el sensor óptico propuesto en columna de agua generada con difusor de burbujas en los laboratorios NTC-UPV. ....	23
Figura 20: Datos de velocidad por los métodos: SIFT, SURF y Optical Flow piramidal: (a) moda; (b) error en base a la velocidad media estimada. ....	24

Figura 21: Perfil de velocidad en función del calado para el canal supercrítico de los laboratorios UPV-IIAMA con velocidad media de: (a) 2.5 m/s; (b) 3 m/s; (c) 3.5 m/s; (d) 4 m/s; (e) 4.5 m/s; (f) 5 m/s; (g) 5.5 m/s. ....	25
Figura 22: Posición burbuja: (a) en el primer fotograma; (b) en el segundo fotograma. ....	26
Figura 23: Haz incidente que se transmite y se refleja.....	28
Figura 24: Coeficientes de reflexión en función del ángulo de incidencia para $n_1=1.5$ y $n_2=1$ . ....	29
Figura 25: Reflexión según el ángulo de incidencia para dos medios con índice de refracción $n_1$ y $n_2$ .....	29
Figura 26: Efecto Goos-Hänchen.....	30
Figura 27: Ángulo crítico: (a) para el agua; (b) para el etanol; (c) para el aire; (d) para el vapor de agua. ....	32
Figura 28: (a) Haz incidente con ángulo próximo al crítico para una burbuja de etanol; (b) Ángulo de incidencia ajustado al ángulo crítico para el aire sin burbuja. ....	32
Figura 29: Diagrama experimental del sensor propuesto para el análisis químico de muestras. ....	32
Figura 30: (a) Mount de rotación PR01/M de Thorlabs; (b) plataforma de traslación en tres ejes MBT602/M de Thorlabs. ....	33
Figura 32: (a) Láser verde tipo diodo; (b) Láser JDSU 1135P de He-Ne. ....	33
Figura 34: (a) CMOS On Semi Python 1300; (b) Cámara Genie Nano 1280M. ....	33
Figura 35: (a) Óptica $f=25$ mm KOWA LM8JC1MS; (b) Lente electrónica Optotune EI-16-40 TC.....	34
Figura 36: Prisma triangular equilátero.....	34
Figura 37: Ejemplo de TIR en laboratorio: (a) Láser rojo; (b) láser verde. ....	34
Figura 38: Setup para identificación del índice de refracción del prisma. ....	35
Figura 39: Diagrama de rayos para el cálculo del índice de refracción del prisma.....	35
Figura 40: Setup para identificación cromatográfica de sustancias. ....	36
Figura 41: Identificación fenómeno TIR en el prisma equilátero: (a) sin fenómeno TIR con agua; (b) con fenómeno TIR con agua; (c) sin fenómeno TIR con peróxido de hidrógeno; (d) con fenómeno TIR con peróxido de hidrógeno.....	36
Figura 42: Diagrama de los algoritmos para la identificación química de sustancias.....	37
Figura 43: Diagrama de bloques para la sustracción del fondo [61].....	38
Figura 44: Ejemplo función <i>imbinarize</i> (Otsu): (a) Imagen en color; (b) Imagen binarizada. ....	39
Figura 45: Binarización local: (a) Imagen en color; (b) Imagen binarizada. ....	39
Figura 46: Ejemplo filtro paso-medio: (a) Imagen con ruido; (b) Imagen con ruido limpiado. ....	39
Figura 47: Ejemplo de filtrado con la función <i>imerode</i> : (a) imagen original [69]; (b) imagen erosionada. ....	40

Figura 48: Ejemplo de dilatación con la función <i>imdilate</i> : (a) imagen original [69]; (b) imagen dilatada. ....	40
Figura 49: Ejemplo función <i>imopen</i> : (a) imagen original [69]; (b) imagen con apertura morfológica. ....	41
Figura 50: Ejemplo de filtrado <i>bwareaopen</i> : (a) Imagen original binarizada [69]; (b) Imagen binarizada con filtrado de objetos definido para 50 píxeles. ....	41
Figura 51: Segmentación: (a) Imagen original; (b) imagen segmentada en objetos. ....	42
Figura 52: Tratamiento digital de imagen con fenómeno TIR: (a) Imagen original;(b) localización del prisma ;(c) imagen fondo;(d) sustracción del fondo;(e) recorte de la zona del prisma;(f) binarización adaptativa;(g) filtrado medio;(h) Apertura de la imagen;(i) filtrado de objetos pequeños;(j) segmentación de los objetos. ....	43
Figura 53: Tratamiento digital de imágenes para el cálculo del índice de refracción: (a) Imagen de referencia; (b) localización del prisma; (c) Imagen original; (d) sustracción del fondo; (e) recorte del haz láser en la imagen; (f) binarización mediante método Otsu; (g) filtrado paso medio; (h) apertura de la imagen; (i) filtrado de objetos pequeños; (j) segmentación de los objetos. ....	44
Figura 54: Tratamiento digital de imagen sin fenómeno TIR: (a) Imagen experimental original; (b) procesado de segmentación de los objetos. ....	45
Figura 55: Ángulo detectado mediante la aplicación de los tratamientos digital de imagen para: (a) 2-propanol; (b) peróxido de hidrógeno. ....	45
Figura 56: Reductor de haz esquema Kepler. ....	47
Figura 57: (a) Haz láser reducido mediante un sistema de lentes; (b) Reflexión total interna en microprisma para índice de refracción de la sustancia de <b>nmuestra</b> = 1.4741.....	47
Figura 58: Diagrama de la divergencia del haz láser en el interior del prisma. ....	48
Figura 59: Esquema conceptual del sistema para el cálculo de velocidad mediante la correlación del reflejo de dos láseres. ....	51

## Índice de tablas

Tabla 1: Comparación de los métodos estudiados para la detección y caracterización de burbujas .....	11
Tabla 2: Comparativa de cámaras para la adquisición de imágenes. ....	13
Tabla 3: Resultados caracterización física de las burbujas en los laboratorios de UPV-NTC.	20
Tabla 4: Parámetros entrada sensor para la adquisición de imágenes para el cálculo de velocidad. ....	22
Tabla 5: Datos de velocidad de los experimentos llevados a cabo en los laboratorios de UPV-IIAMA. ....	24
Tabla 6: Resultados de velocidades de las burbujas y los errores asociados a los tres métodos. ....	26
Tabla 7: Datos del índice de refracción usados en las simulaciones. ....	31
Tabla 8: Parámetros entrada sensor para la adquisición de imágenes. ....	42
Tabla 9: Resultados índices de refracción de las distintas sustancias con un prisma con índice de refracción de 1.4970 . ....	46
Tabla 10: Resultados índices de refracción de las distintas sustancias con un prisma con índice de refracción de 1.5015. ....	46
Tabla 11: Índices de refracción de las distintas sustancias bajo estudio. ....	59

### Capítulo 1. Introducción

Un flujo multifase es el flujo que está compuesto por mezclas heterogéneas o más de una fase, como puede ser gas-líquido, sólido-líquido o gas-sólido [1]. Muchas tecnologías de generación y procesado tratan con flujo multifase, desde bombas cavitantes y turbinas hasta procesos de electrofotografía o de fabricación de papel y la capacidad de predecir el comportamiento del flujo multifase es fundamental para la eficiencia y eficacia de dichos procesos [2]. El objetivo principal de este Trabajo Final de Grado es estudiar y desarrollar y demostrar experimentalmente una tecnología fotónica experimental para la medición de la fracción de aire (u otras partículas) en flujos multifásicos y también la detección y caracterización física de partículas en suspensión en flujos multifase agua-aire y se ha llevado a cabo en las instalaciones del Instituto Universitario de Investigación de Tecnología Nanofotónica (NTC) en la Universitat Politècnica de València (UPV).

Este Trabajo Final de Grado se ha centrado capacidad de caracterización físico-química de flujos multifase. En concreto, para la caracterización física se han desarrollado algoritmos de procesado digital para calcular la velocidad de las burbujas dentro del flujo multifase, mientras que la caracterización química se realiza mediante el cálculo del ángulo crítico de la propagación del haz láser.

Las técnicas investigadas en este proyecto tienen aplicación en medios líquidos y gaseosos en instalaciones de generación eléctrica hidráulica, ya que una completa caracterización del flujo multifase presentes en centrales de generación eléctrica permitirán una gestión óptima de vida útil de los activos de generación, tal como se está desarrollando en el proyecto Retos-Colaboración RTC-2014-2232-3 HIDRASENSE titulado “Nueva tecnología fotónica de detección avanzada de aire y vapor de agua en fluidos de centrales de generación eléctrica para la gestión eficiente de los recursos energéticos” desarrollado por Iberdrola Generación S.A y la Universitat Politècnica de València. Además, la caracterización de compuestos químicos propuesta en este trabajo también puede aplicarse a análisis bioquímicos y otras aplicaciones biomédicas.

#### 1.1 Objetivos

El objetivo general de este trabajo final de grado consiste en la evaluación y test de tecnologías fotónicas experimentales para la caracterización físico-química de sustancias incluyendo el cálculo de velocidad del flujo multifase. Los objetivos concretos pueden resumirse en:

- a) Revisión del estado del arte de diferentes técnicas para la caracterización de flujos multifase.
- b) Estudio de los principios fotónicos de propagación láser.
- c) Estudio de técnicas de tratamiento digital de imágenes incluyendo técnicas filtrado, detección y emparejamiento de características y segmentación.
- d) Desarrollo de tecnología óptica para la caracterización de la velocidad de flujos multifase.
- e) Diseño y programación de los algoritmos necesarios para la estimación de movimiento mediante técnicas de tratamiento digital de imágenes.
- f) Desarrollo de la tecnología óptica para la identificación química de partículas en suspensión en flujos multifase.
- g) Diseño y programación de los algoritmos para la identificación química de partículas en suspensión.
- h) Validación experimental de las técnicas propuestas mediante pruebas de concepto en el laboratorio.

## **1.2 Metodología**

La metodología del proyecto se basa en el método científico compuesto por: (i) Estudio teórico del problema a analizar, (ii) diseño de la solución a implementar, (iii) validación experimental y análisis de resultados. A continuación, se describen las distintas fases seguidas en el plan de trabajo, así como un cronograma con las tareas principales desarrolladas en este TFG.

### **1.2.1 Plan de trabajo**

A continuación, se describen las distintas fases en las que se ha realizado este trabajo final de grado. Cada fase se divide en distintas tareas, cuya duración se incluye en la descripción de cada una de ellas.

**FASE 1: ESTUDIO TEÓRICO.**

**FASE 2: DESARROLLO DEL SENSOR PARA EL CÁLCULO DE LA VELOCIDAD.**

**FASE 3: DESARROLLO DEL SENSOR PARA LA IDENTIFICACIÓN QUÍMICA.**

**FASE 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS, DISEMINACIÓN Y REDACCIÓN DEL TFG.**

#### **FASE 1: ESTUDIO TEÓRICO**

La Fase 1 tiene como objetivo el estudio del estado del arte en cuanto a las técnicas de sensado óptico destinado a centrales hidráulicas y técnicas de sensado biomédico. Las técnicas ópticas que se desarrollarán en este Trabajo Final de Grado se especifican en base al estado del arte. La siguiente tarea forma parte de la FASE 1:

##### **Tarea T1.1. Análisis del estado del arte de caracterización de flujos multifase**

Duración: 4 semanas

En esta tarea se estudia el estado del arte sobre técnicas de caracterización de flujos multifase, incluyendo técnicas de sensado acústico y optoelectrónico para caracterización de burbujas y elementos en suspensión en flujos multifase. El resultado de esta tarea se resume en el Capítulo 2 de esta memoria.

#### **FASE 2: DESARROLLO DEL SENSOR PARA EL CÁLCULO DE LA VELOCIDAD**

La Fase 2 tiene como objetivo el desarrollo de las tecnologías fotónicas para el cálculo de la velocidad de burbujas en flujos multifase y los algoritmos de procesado de señal asociados en base al estado del arte identificado en la FASE 1. Además, también se realiza la demostración de funcionamiento en laboratorio y la evaluación de las prestaciones del sistema desarrollado. Las siguientes tareas forman parte de la FASE 2:

##### **Tarea T2.1. Algoritmo para el cálculo de velocidad**

Duración: 4 semanas

En esta tarea se desarrollan los algoritmos necesarios para el cálculo de la velocidad de burbujas en flujos multifásicos para la caracterización de partículas en suspensión en fluidos. El resultado de esta tarea se resume en la sección 4.2 de esta memoria.

##### **Tarea T2.2. Test funcional en laboratorio**

Duración: 3 semanas

En esta tarea se realiza la demostración experimental en laboratorio de la tecnología desarrollada para el cálculo de la velocidad de burbujas en flujos multifásicos. Dentro de esta tarea se realizan una serie de ensayos para la evaluación de las prestaciones del sistema. Por lo tanto, se realiza una calibración de los algoritmos en los laboratorios del UPV-NTC, para

posteriormente, evaluar su funcionamiento en los laboratorios del UPV-IIAMA dónde están disponibles las infraestructuras y equipos necesarios para la reproducción de flujos aireados. El resultado de esta tarea se resume en la sección 4.3 de esta memoria.

### **FASE 3: DESARROLLO DEL SENSOR PARA LA IDENTIFICACIÓN QUÍMICA**

La Fase 3 tiene como objetivo el desarrollo del sensor para la identificación química de las partículas en suspensión en flujos multifásicos y los algoritmos de procesado asociados en base al estado del arte identificado en la FASE 1. Para ello, se realizan simulaciones para la validación del sistema a desarrollar. También se realiza la demostración y la evaluación de las prestaciones en laboratorio del sistema desarrollado. Las siguientes tareas forman parte de la FASE 3:

#### **Tarea T3.1. Estudio mediante simulaciones de la tecnología propuesta**

Duración: 2 semanas

En esta tarea se efectúan simulaciones para la validación de la tecnología propuesta a desarrollar mediante el software de simulación multifísica (COMSOL Multiphysics). El resultado de esta tarea se resume en la sección 5.2 de esta memoria.

#### **Tarea T3.2. Algoritmo para la identificación química**

Duración: 3 semanas

En esta tarea se desarrollan los algoritmos necesarios para la identificación de la composición química de partículas en suspensión en flujos multifásicos. El resultado de esta tarea se resume en la subsección 5.3.2 de esta memoria.

#### **Tarea T3.3. Test funcional en laboratorio**

Duración: 2 semanas

En esta tarea se realiza la demostración experimental en laboratorio de la tecnología desarrollada para la identificación de la composición química de partículas en suspensión en flujos multifásicos. Dentro de esta tarea se realizan una serie de ensayos para la evaluación de las prestaciones del sistema en los laboratorios del UPV-NTC. El resultado de esta tarea se resume en la subsección 5.3.3 de esta memoria.

### **FASE 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS, DISEMINACIÓN Y REDACCIÓN DEL TFG**

La Fase 4 tiene como objetivo el análisis de los resultados obtenidos, para su posterior diseminación y la redacción de la memoria de este TFG.

#### **Tarea T4.1. Análisis de resultados y actividades de diseminación**

Duración: 4 semanas

En esta tarea se realiza un análisis exhaustivo de los resultados obtenidos y se plantean las conclusiones y las posibles líneas abiertas de investigación futura. Además, en esta tarea se preparan los resultados susceptibles de publicación mediante la redacción de los correspondientes artículos científicos. Los resultados de esta tarea se reportan en el Capítulo 6 de esta memoria.

#### **Tarea T4.2. Redacción del TFG**

Duración: 3 semanas

En esta tarea se realiza la redacción de la memoria asociada a este Trabajo Final de Grado, incluyendo un análisis del estado del arte y las dos tecnologías propuestas. En los anexos se incluyen las publicaciones de artículos científicos asociadas a este TFG.

### **Tarea T4.3. Participación en actividades de formación**

Duración: 11 semanas

En esta tarea se participa en actividades de formación para la adquisición de los conocimientos necesarios para la realización de este Trabajo Final de Grado. Se asiste al seminario Introducción a Labview de NATIONAL INSTRUMENTS, al seminario de Modelado multifísico EM de ADDLINK SOFTWARE CIENTÍFICO y al seminario de procesado digital de señal y modelado de antenas con MATLAB. También se participa en el cursillo de formación online *Machine Learning* de la Universidad de Standford.

#### **1.2.2 Cronograma**

La Figura 1 muestra el cronograma de las tareas correspondientes a este Trabajo Final de Grado divididas en las cuatro fases descritas anteriormente a lo largo de 23 semanas de duración.

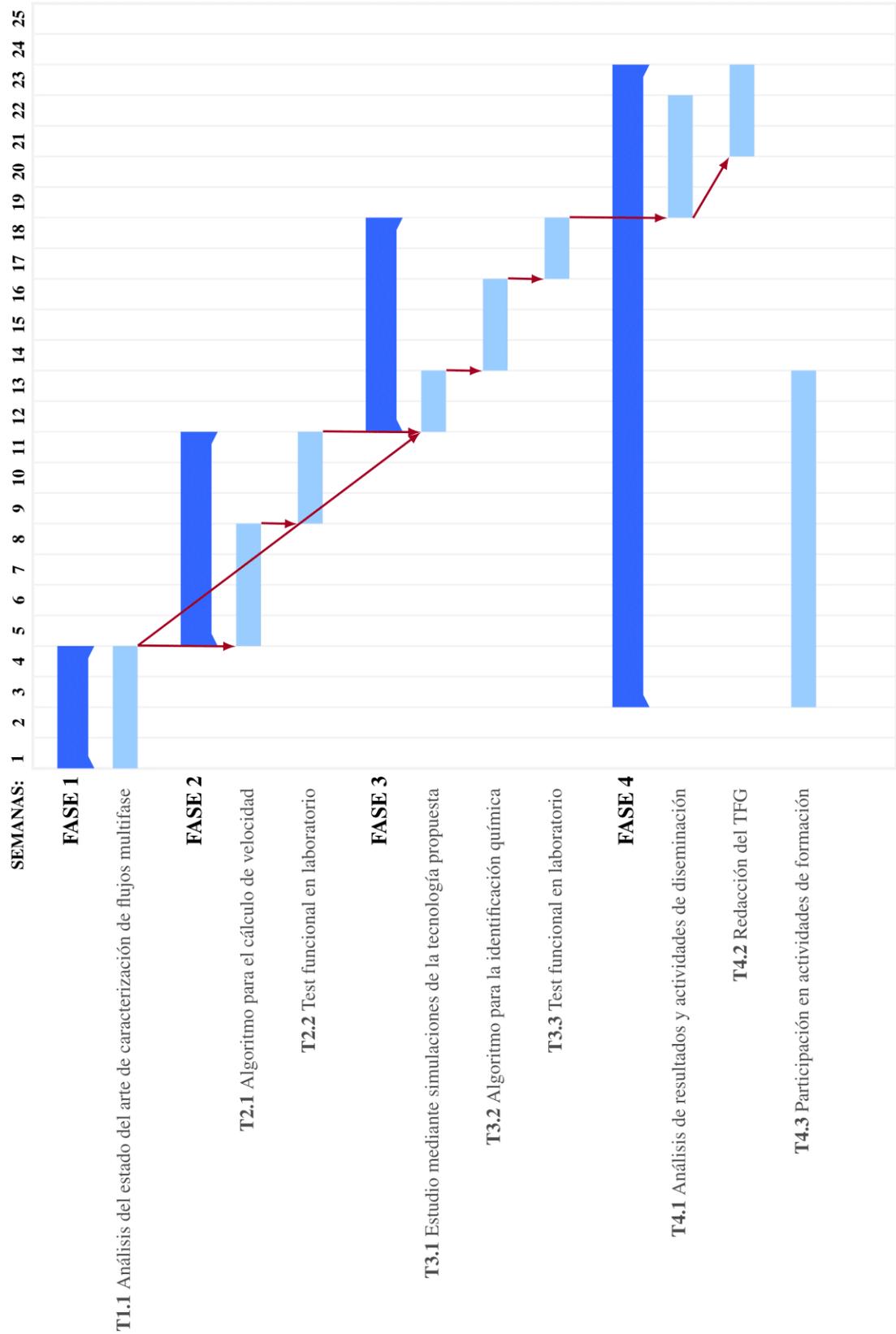


Figura 1: Cronograma de tareas seguido en este TFG.

## Capítulo 2. Análisis del estado del arte para la detección y caracterización de burbujas

Durante las últimas décadas, se han realizado diversos estudios científicos para la detección de partículas en suspensión y de vapor de agua en medios líquidos, dando lugar a un flujo multifase.

Un flujo multifase es el flujo con compuesto por mezclas heterogéneas o más de una fase como se explica en el Capítulo 1. Un ejemplo de dicho fenómeno es la cavitación.

La cavitación es la formación y actividad de burbujas (o cavidades) en un líquido debido a cambios de presión en el líquido [1]. Refiriéndose con formación a la creación de una nueva cavidad o a la expansión de una preexistente a tamaños donde los efectos macroscópicos pueden ser observados. Estas burbujas pueden encontrarse suspendidas en un líquido o pueden estar atrapadas en pequeñas grietas en la superficie del líquido o en partículas sólidas suspendidas en un líquido [3]. El daño por cavitación puede provocar el colapso de estructuras de desagüe como se puede observar en la Figura 2. Más información acerca de la cavitación en aliviaderos y el efecto de la velocidad puede encontrarse en Falvey [4], quien sugiere que cualquier flujo con velocidades por encima de 10 m/s puede dar lugar a daños por cavitación. La detección de burbujas de aire es también de gran importancia pues es capaz de proteger las superficies del daño por cavitación.



**Figura 2: Daño por cavitación en el órgano de desagüe de la presa de Glen Canyon, EEUU en 1983 [4]. El agujero tiene una profundidad de 11m.**

Además, el flujo multifase también es crucial para aplicaciones biomédicas. La sangre representa un flujo multifase donde los glóbulos rojos son el principal componente en el plasma sanguíneo [5], siendo la composición celular de la sangre un factor esencial en su flujo [6], por ello la concentración y velocidad de RBC (del inglés, *red blood cells*) ha sido objeto de estudio [7]. Otro aspecto importante [8], es la detección de burbujas de aire para el diagnóstico y tratamiento de embolismo aéreo venoso, que puede ser una complicación letal para procedimientos quirúrgicos [9]. También se hace uso de la cavitación en aplicaciones biomédicas, haciendo uso de los efectos dañinos del colapso de las burbujas para cirugías y litotripsias [5], por ejemplo, en el tratamiento de cálculos biliares con pulsos de ultrasonidos, o también se hace uso de cavitación en cirugías oculares láser, por lo que es fundamental su detección y localización.

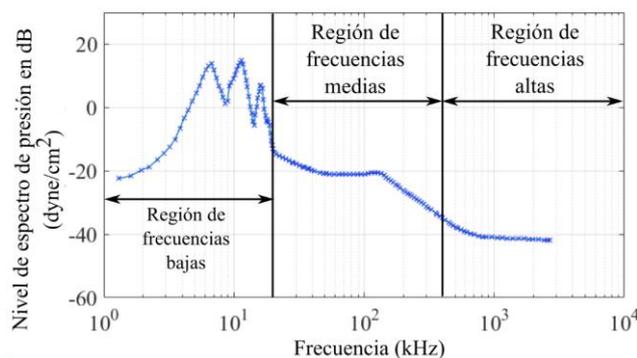
La mayoría de los estudios relacionados con la detección y caracterización de flujos multifase se dividen en técnicas acústicas y en técnicas optoelectrónicas. En este capítulo se resumen las técnicas más relevantes en cada caso.

### 2.1 Técnicas acústicas

Uno de los fenómenos más característicos de la cavitación es la producción de ruido resultante de su colapso, además de la posibilidad de daño material a las superficies sólidas cercanas debido a las grandes presiones en las burbujas cuando se encuentran muy comprimidas [10]. Por lo que se han propuesto métodos para la detección de vapor de agua mediante el estudio del espectro audible [11].

Debido a este hecho, el espectro del ruido producido por la implosión de burbujas de cavitación ha sido objeto de estudio desde hace muchos años. Mellen estudió el espectro producido [12], diferenciándolo en tres regiones importantes, como se pueden observar en la Figura 3:

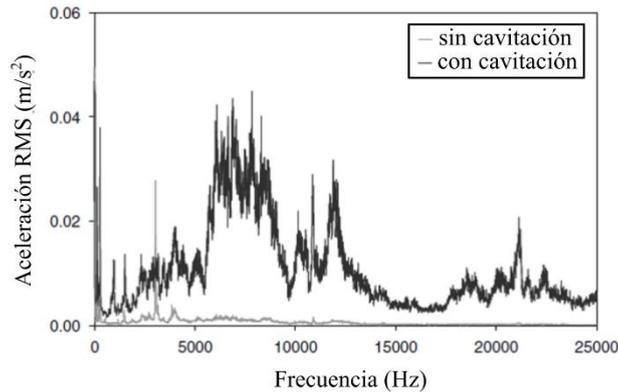
1. Frecuencias bajas (frecuencias inferiores a 20 kHz) dónde se genera una perturbación de bajo orden con grandes picos de intensidad.
2. Rango de frecuencias medias (entre 20 y 500 kHz), dónde se puede observar una región llana debido a impulsos de ocurrencia y amplitud aleatoria.
3. Frecuencias por encima de los 500 kHz, dónde se generan impulsos aleatorios de duración más corta debido probablemente a la fase final del colapso.



**Figura 3: Espectro de potencia acústica producido por cavitación generada mediante una varilla agitadora (Fuente: Donald [13]).**

Dado que la cavitación genera ruido en un espectro superior al audible, su detección es más sencilla en altas frecuencias debido a la menor presencia de ruido externo [14].

Otros autores, como Escaler et. al [15], estudiaron el ruido producido por el flujo sin presencia de cavitación y con cavitación mediante el uso de acelerómetros en turbinas. En la Figura 4 se muestra la aceleración RMS (del inglés, *root mean square*) producida en una turbina con y sin presencia de cavitación. Se puede observar que a mayor frecuencia más fácil es la detección de la cavitación, siempre que esté en el rango de frecuencias en el que la cavitación sigue produciendo ruido (tal como se mostraba anteriormente en la Figura 3).



**Figura 4: Ruido en una turbina Francis producido con y sin presencia de cavitación [15].**

La detección de cavitación mediante técnicas acústicas se ha realizado también en el estado del arte mediante el empleo de acelerómetros, sensores de emisión acústica, sensores de presión e hidrófonos. Existen estudios donde la detección de cavitación se ha llevado a cabo en turbinas [15], en bombas centrífugas [16], en válvulas hidráulicas [17] y en aliviaderos escalonados en laboratorios [18].

También se ha hecho uso de hidrófonos de fibra óptica para la detección del ruido espectral producido por cavitación [19]. La onda acústica que se propaga por el fluido realiza una modulación de fase del haz óptico [20]. Este efecto surge por variaciones del índice de refracción inducido. Para que sea medible el cambio de fase, la amplitud de la presión acústica debe ser suficientemente grande, ya que el acople optoacústico es débil.

El principal inconveniente de estas técnicas es que, a pesar de ser posible la detección de la cavitación, sólo se puede detectar su presencia. No se puede calcular la velocidad o el tamaño de las burbujas a partir de la presión acústica producida por el colapso de las burbujas. Además, sólo las burbujas de cavitación producen un sonido característico, por lo que otras sustancias no pueden ser detectadas mediante estas técnicas.

## 2.2 Técnicas optoelectrónicas

Los métodos de detección optoelectrónicos habitualmente utilizan una fuente de luz láser para la medición de las expansiones y colapsos de burbujas y ondas de choque asociadas. La detección de burbujas se puede realizar mediante técnicas de medidas de desviación del haz láser, más conocida como BPD (*beam-deflection probe*) [21]. En la técnica BPD se incide con un láser He-Ne en el recipiente que contiene agua, para detectar la desviación producida por las burbujas mediante un fotodiodo.

En la Figura 5(a) se muestra un ejemplo del montaje experimental realizado para la detección de burbujas mediante la desviación de un haz láser de He-Ne. Para ello, primero se genera la burbuja de cavitación de forma controlada en el laboratorio mediante el uso de un láser pulsado Nd:YAG. No obstante, si esta técnica se aplicara a un cúmulo de burbujas se puede producir un efecto multiscattering debido a las múltiples colisiones con distintas burbujas. El haz láser puede verse muy desviado por dicho efecto, siendo necesario una matriz de fotodiodos de grandes dimensiones para poder detectar la señal transmitida. Además, si la distancia entre los fotodetectores y el láser es muy grande, la desviación producida por una burbuja a lo largo de dicha distancia puede ser también elevada, siendo igualmente necesario una matriz de fotodiodos para la detección. En la Figura 5(b) se puede observar el resultado de una simulación realizada mediante COMSOL Multiphysics del aumento de la región de detección con una burbuja de 5 mm a 3 metros de distancia de la región de detección, ampliando el diámetro de esta región a una dimensión aproximada de 2 metros de diámetro. Por último, el haz láser también puede interactuar con partículas en suspensión que pueden llegar a bloquearlo.

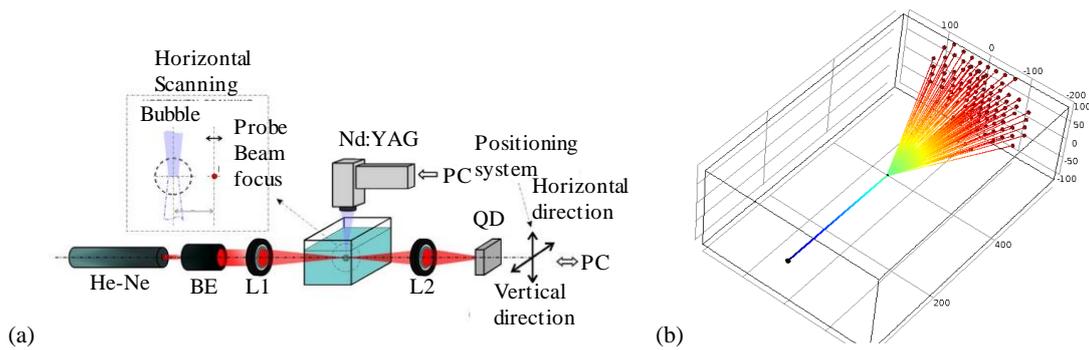


Figura 5: (a) Montaje experimental para detección de burbujas mediante BPD [21]; (b) simulación de la región de detección necesaria para una burbuja de 5 mm.

También se han usado sondas ópticas de reflectividad para el estudio de las burbujas en lechos fluidizados [22]. Un lado emisor, emite luz al lecho fluidizado, mientras que otro lado receptor mide la intensidad de la luz reflejada por burbujas o sólidos. En el caso de que sea una burbuja, se refleja menos luz en comparación con los sólidos. La intensidad reflejada se mide como una tensión, por lo que una gran tensión equivale a sólidos, mientras que tensiones más bajas se deben al paso de burbujas. Para la evaluación del tamaño y velocidad de las burbujas es necesario el uso de dos sondas, una para obtener el tamaño de la burbuja según el tiempo en el que se encuentra una misma burbuja en un sensor, y dos para calcular la velocidad en base a la diferencia de tiempo entre el que la misma burbuja pasa por los dos sensores. En la Figura 6 se puede observar un esquemático del principio usado para determinar la velocidad y tamaños de burbujas mediante el uso de dos sondas ópticas de reflectividad.

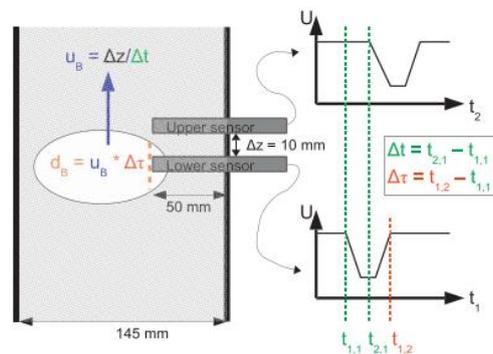


Figura 6: Principio esquemático para determinar el tamaño de las burbujas y la velocidad mediante el uso de dos sondas ópticas [22].

Además, también se ha hecho uso de sondas ópticas con cuatro fibras para la medida de la velocidad y tamaño de burbujas en columna de agua [23] en tuberías. La velocidad de la burbuja, en este caso, se calcula mediante el uso del tiempo que tarda la burbuja de la fibra central a las otras tres fibras.

El principal inconveniente de este método es que se trata de una técnica invasiva ya que la sonda debe atravesar la burbuja, además, se debe saber la dirección del flujo de antemano, ya que la sonda debe estar orientada en paralelo a la dirección del flujo, por lo que, si esta cambiara debido a posibles turbulencias no se podrían detectar burbujas.

### Capítulo 3. Tecnología propuesta y comparación con el estado del arte

En este Trabajo Final de grado se desarrolla un sensor capaz de determinar la velocidad del flujo multifásico mediante iluminación láser y sensado con tratamiento digital de imágenes e identificar el compuesto químico de la partícula en suspensión. Utilizando las técnicas evaluadas anteriormente en el estado del arte no se puede realizar la caracterización físico-química del flujo multifase de forma no invasiva que no modifique el flujo. Por este motivo, y combinando diferentes aspectos de las técnicas vistas en el Capítulo 2 se propone un nuevo sensor óptico basado en iluminación láser, detección con sensor CMOS (del inglés, *Complementary metal-oxide-semiconductor*) y las correspondientes técnicas de procesado digital de imagen para el cálculo de velocidad, tamaño, concentración de burbujas presentes en el flujo, así como su composición química.

Uno de los parámetros más importantes para la caracterización del flujo multifase se trata de la velocidad. En grandes obras hidráulicas el flujo se acelera debido a la gravedad alcanzando altas velocidades. Para velocidades mayores de 15-18 m/s, muchos cuencos de amortiguación son susceptibles de sufrir cavitación [24]. Además, pequeñas protuberancias en las juntas de los aliviaderos pueden dar lugar a cavitación si las velocidades son suficientemente altas. Para el cálculo de velocidad se hace uso de iluminación láser y una cámara de alta velocidad, que permite reducir el tiempo de exposición para la obtención de una captura nítida y con una velocidad de grabación elevada para que el movimiento entre fotogramas sea lo más reducido posible y los objetos se vean modificados lo menor posible por el entorno.

Para el cálculo de velocidad de las partículas en suspensión presentes en el flujo se hace uso de técnicas de tratamiento digital de imágenes basadas en la estimación del movimiento en imágenes basada en el seguimiento de patrones de brillo estructurados como el Optical Flow piramidal [25], y técnicas basadas en la búsqueda y correspondencia de puntos característicos mediante el uso de descriptores como el método SIFT [26] o el método SURF [27].

Con esta tecnología se puede evaluar la velocidad en un campo de trabajo mayor al de las técnicas optoelectrónicas explicadas en la sección 2.2, en las que sólo se podía medir la velocidad de las burbujas en un punto cerca del final de la sonda de una sola burbuja a la vez. En el Capítulo 4 se detalla la descripción de la tecnología propuesta, incluyendo la iluminación óptica usada, los algoritmos propuestos para el cálculo de la velocidad y los resultados obtenidos.

Por otra parte, también se propone el uso de un sensor basado en el efecto de la reflexión total interna para la obtención del índice de refracción de las partículas en suspensión característico de cada compuesto químico. Existen técnicas propuestas para el cálculo de índice de refracción mediante el fenómeno de reflexión [28], pero la mayoría se basan en la medida de las fluctuaciones de intensidades de luz medidas por un fotodetector [29]. En este caso el sensor se basa en un sensor CMOS para la captura de la intensidad de la luz.

El sensor hace uso de un haz láser incidente en un prisma equilátero para obtener el índice de refracción mediante la búsqueda del ángulo crítico y su captura con una cámara de alta velocidad, lo que permite la obtención de los ángulos incidentes y reflejados para obtener el índice de refracción. Debido a que el cálculo del índice de refracción es característico para cada compuesto, se puede detectar mayor número de partículas en suspensión que mediante el estudio del espectro acústico explicado en la sección 2.1, en el que solo se puede detectar cavitación, pero no se puede diferenciar cavitación de aireación como se explica en la sección 5.2.

Esta tecnología también tiene importancia en el ámbito biomédico ya que una determinación precisa del ángulo crítico de diferentes sustancias puede resultar en una caracterización de muestras más fiable para diagnóstico [30], el uso de biosensores ópticos para aplicaciones médicas e industriales ha aumentado mucho en los últimos años debido a su simplicidad y alta

sensibilidad [31]. Los biosensores basados en el TIR se pueden usar para la detección de enfermedades [32], para medir ensayos biomoleculares [33] y para aplicaciones industriales [34].

En el Capítulo 5 se detallan los principios fotónicos en los que se basa la identificación química de las partículas, simulaciones realizadas que resuelven las ecuaciones de Fresnel y los parámetros de Stokes para la validación del sensor, los algoritmos propuestos para el cálculo del índice de refracción y los resultados experimentales.

### 3.1 Resumen de ventajas e inconvenientes

En la Tabla 1 se resumen las ventajas y desventajas de cada uno de los métodos estudiados para la detección y caracterización de burbujas en el Capítulo 2 y se comparan con las tecnologías propuesta en este Trabajo Final de Grado.

**Tabla 1: Comparación de los métodos estudiados para la detección y caracterización de burbujas.**

Método	Ventajas	Desventajas
Técnica basada en espectro acústico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite la detección de cavitación.</li> <li>• Permite la posibilidad de realizar aplicación en tiempo real.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El sensor debe situarse próximo a la zona de flujo cavitante.</li> <li>• El ruido debido a otros factores externos dificulta la detección.</li> <li>• No se pueden detectar partículas en suspensión.</li> <li>• No se puede calcular la velocidad de las burbujas detectadas</li> </ul>
Técnica basada en el método Beam-deflection probe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El coste económico no es elevado.</li> <li>• Permite la posibilidad de aplicación en tiempo real.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es útil cuándo sólo hay una burbuja.</li> <li>• Dificultad para distinguir aireación de cavitación.</li> <li>• Permite distinguir entre ondas de choque y cavitación.</li> </ul>
Sonda óptica de reflectividad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se trata de un método simple.</li> <li>• Permite la posibilidad de realizar aplicación en tiempo real.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es necesario saber la dirección del flujo para posicionar el sensor.</li> <li>• Las partículas deben estar próximas al sensor.</li> <li>• El tamaño de las burbujas debe ser mayor al de las fibras.</li> <li>• Es una técnica invasiva.</li> </ul>
Caracterización mediante Tratamiento Digital de Imágenes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se pueden caracterizar múltiples burbujas al mismo tiempo.</li> <li>• El campo de visión puede ser grande, para caracterizar una zona más amplia.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El elevado tiempo de computación dificulta la caracterización en vivo.</li> <li>• No se puede enfocar a planos lejanos si hay muchas partículas en planos anteriores.</li> </ul>
Identificación mediante TIR	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede diferenciar entre amplia variedad de partículas.</li> <li>• Se trata de un método simple.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No se puede diferenciar entre cavitación y aireación.</li> <li>• Se tiene que variar el ángulo de incidencia para detectar distintas partículas.</li> </ul>

## Capítulo 4. Técnica A: Cálculo de la velocidad de burbujas en flujos multifase mediante iluminación láser y procesamiento digital

En este capítulo se describe la tecnología propuesta para el cálculo de la velocidad de burbujas en flujos multifase y se desarrolla el algoritmo asociado.

### 4.1 Principio óptico

El sensor hace uso de un láser con una lente negativa para divergir el haz láser, además de un LED con un filtro difusor y un sensor CMOS, que recibe la intensidad de luz en los fotositos para producir una corriente eléctrica para formar la imagen basándose en el efecto fotoeléctrico [35]. En la Figura 7 se muestra una figura descriptiva de los componentes del sensor correspondientes para la caracterización física de las burbujas y el cálculo de velocidad.

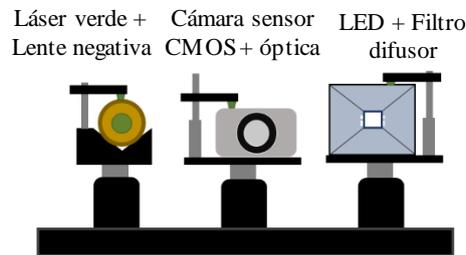


Figura 7: Diagrama de los componentes del sensor propuesto.

#### 4.1.1 Descripción sensor CMOS

Para la adquisición de imágenes utilizamos una cámara Genie Nano M1280 [36] que contiene un sensor CMOS On-Semi Python 1300 integrado. Se seleccionó esta cámara después de comparar varias marcas y modelos debido a su resolución, velocidad de captura y posibilidad de control remoto. En la Tabla 2 se pueden observar las cámaras que se preseleccionaron para la aplicación y se compararon. Se seleccionó la cámara Genie Nano M1280 debido a que, a pesar de que su resolución es inferior al resto de cámaras, permitía el control remoto y su alta velocidad de captura facilita los cálculos de estimación de movimiento. El control de la adquisición de imágenes se realiza vía Ethernet mediante el uso de un software que controla el sensor. Para ello, se hizo uso del paquete Image Acquisition Toolbox de MATLAB que incorpora funciones para la conexión de cámaras industriales y científicas permitiendo variar los parámetros de tiempo de exposición, ganancia, región de interés y velocidad de grabación entre otros [37].

Uno de los parámetros más importantes para la detección de velocidad se trata del tiempo de exposición. El tiempo de exposición hace referencia al parámetro que indica el tiempo en el que el sensor captura luz [38]. Debido a la necesidad de reducir el tiempo de exposición para que la imagen no quede borrosa y sea lo más nítida posible, es muy importante la iluminación. Por ello, se plantea el uso de iluminación externa mediante el uso de un láser a una longitud de onda de 532 nm debido a que la eficiencia cuántica del sensor es mejor a dicha longitud de onda, como se muestra en la Figura 8.

La conexión de datos se realiza mediante el estándar Gige Vision [39], basado en el *Internet Protocol* (IP) que define los protocolos de transferencia de datos vía conexiones Ethernet.

Tabla 2: Comparativa de cámaras para la adquisición de imágenes.

Marca	Modelo	Resolución	Velocidad de captura	Control remoto
Teledyne DALSA	Genie Nano M1920	1920×1200 (2.3MP)	39 fps	Si
Teledyne DALSA	Genie Nano M1280	1280×1024 (1.31MP)	213 fps	Si
Allied Vision Technologies	Mako G-192	1600×1200 (1.9MP)	60 fps	Si
Allied Vision Technologies	Manta G-609	2752×2206 (6MP)	15.2 fps	Si
IDS Imaging	uEye 3250LE	1600×1200 (1.9MP)	60 fps	No
IDS Imaging	UI-3140CP	1280×1024 (1.31MP)	224 fps	No

El sensor CMOS necesita alimentación por corriente mediante un sistema *Power-over-Ethernet* (PoE) a través de una conexión RJ-45. La principal ventaja de la conexión utilizada es la posibilidad de disponer de una longitud de 100 metros de cable RJ-45 sin pérdida de paquetes de datos, a pesar que su ancho de banda es inferior a otras conexiones como el USB 3.0.

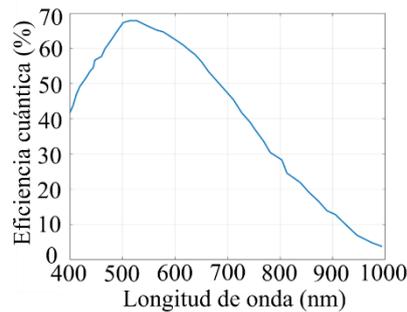
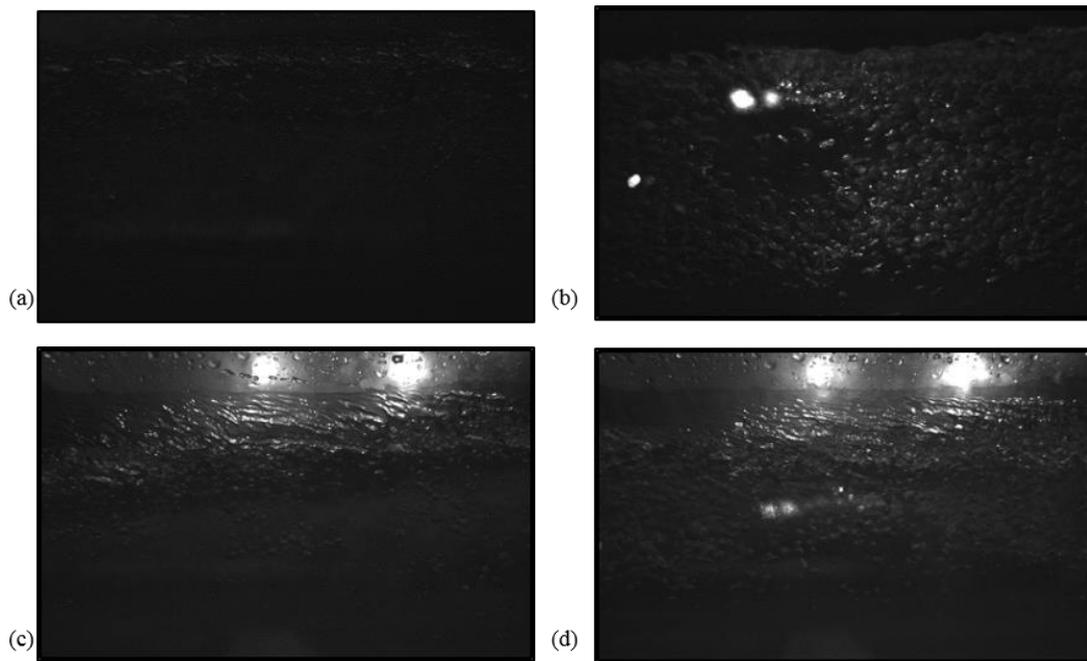


Figura 8: Eficiencia cuántica del sensor CMOS On Semi Python 1300 [40].

#### 4.1.2 Iluminación óptica

En primer lugar, se probaron distintas configuraciones de iluminación a fin de determinar las características lumínicas óptimas para la adquisición de imágenes en un canal hidráulico con un flujo multifase aire-agua circulando a alta velocidad.

En la Figura 9 se muestra un ejemplo de adquisición de imágenes en un flujo multifase a velocidad lineal de 3.9 m/s. Estas medidas se han realizado en los laboratorios de Hidráulica y Obras Hidráulicas de la Universitat Politècnica de València (UPV-IIAMA) en un canal horizontal de sección rectangular de 0.3 m de ancho, 1 m de alto y 10 m de longitud que puede alcanzar números de Froude similares a los que se dan en los aliviaderos de presa de hasta valores de  $F_r = 13$ , lo que se corresponde con regímenes de flujo supercrítico. Comparando las imágenes capturadas con diferentes condiciones de iluminación mostradas en la Figura 9, se confirma que es necesario el uso de una fuente óptica para la correcta detección de burbujas, debido a que la complejidad de la caracterización de flujos de alta velocidad radica en la necesidad de tiempos de exposición muy bajos, como se ha comentado anteriormente en la sección 4.1.1.



**Figura 9: Imágenes capturadas con 38.8 fps y tiempo de exposición de 216  $\mu$ s en un flujo multifase aire-agua a 3.9 m/s: (a) Sin iluminación; (b) con iluminación con láser verde; (c) con iluminación solo con focos LED en dirección perpendicular a la dirección del flujo; (d) iluminación con láser verde y focos LED.**

En la Figura 9(a) se puede observar el ejemplo de un fotograma capturado sin ningún tipo de iluminación externa, tan sólo con luz ambiental, y se confirma que esta iluminación es insuficiente, por lo que es necesario iluminar con alguna fuente óptica para poder detectar las burbujas. En la Figura 9(b), se puede observar unos resultados considerablemente mejores al hacer uso de una fuente óptica láser verde, aunque la iluminancia sigue siendo mejorable, por ello se prueba iluminación LED, como se muestra en la Figura 9(c) y se comprueba que a pesar de ser una iluminación uniforme, no es suficiente. Por lo que, para conseguir una iluminación idónea, se emplea una fuente óptica láser verde con un refuerzo de iluminación LED difusa para conseguir una mayor iluminancia, como se muestra en la Figura 9(d). La dificultad de la iluminación láser reside en la colimación de las fuentes, debido a que al estar tan concentrada la iluminación produce destellos en las imágenes, por lo que es necesario el uso de lentes negativas para divergir el haz láser y que sea más uniforme la iluminación.

Por lo tanto, en base a los resultados obtenidos en las primeras pruebas experimentales, las condiciones de iluminación óptimas para el cálculo de velocidad en flujos de alta velocidad se alcanzan con la combinación de iluminación láser con lente negativa y luz difusa LED blanca.

#### **4.1.3 Lente plástica sintonizable**

La tecnología de sensado óptico propuesta incorpora una lente plástica (en este caso modelo Optotune® EL-16-40-TC) que permite modificar las dioptrías de la lente de forma electrónica en función de la corriente (dentro del rango entre -250 y 250 mA). Según la corriente aplicada, el polímero de la lente modifica su forma permitiendo controlar la potencia focal de -2 a 3 dioptrías, lo que permite el enfoque a distintos campos de trabajo en función de la posición de las burbujas en el flujo. El propio dispositivo tiene incorporado un software propietario llamado "Lens Driver Controller" que permite configurar el nivel de corriente suministrado a la lente a través de la conexión USB-hirose conectada al ordenador. No obstante, para poder controlar todos los subsistemas del sensor propuesto de manera automatizada, se ha programado un archivo .vi al que se accede mediante controles de ActiveX desde MATLAB en tiempo real. ActiveX es una tecnología de Microsoft para definir componentes de software reusables independientemente del

lenguaje de programación en Microsoft Windows [41]. Mediante dichos componentes software es posible acceder al fichero .vi de LabVIEW desde MATLAB para cambiar la corriente proporcionada a la lente plástica.

En la Figura 10(a) se puede observar un ajuste lineal que muestra la transformación entre la intensidad introducida a la lente y la potencia focal en dioptrías resultante del cambio de la forma del polímero. La potencia focal aumenta con corriente positiva y decrece con corriente negativa en función de:

$$\text{Potencia focal} = 0.01715 \times \text{Intensidad} + 0.4633 \quad (4.1)$$

Mediante la ecuación 4.1 se introduce la potencia focal que se desee mediante MATLAB y le suministra la intensidad necesaria a la lente mediante la conexión USB-hirose. Esto se realiza a partir de un programa desarrollado mediante MATLAB que controla los datos de entrada al sensor como se puede ver en la Figura 10(b). En dicho programa se puede seleccionar tanto la potencia focal deseada, como parámetros de entrada para el sensor CMOS (tiempo de exposición, velocidad de grabación, ganancia y tiempo de grabación), la tensión deseada para suministrar al láser y el LED y el movimiento del robot para medidas en distintos calados. Para la realización del programa, se seleccionó MATLAB como plataforma centralizada para el control y procesamiento de datos debido a su amplia gama de *toolboxes* enfocadas a la conectividad de dispositivos mediante conexiones USB y a tratamiento y procesamiento de datos e imágenes.

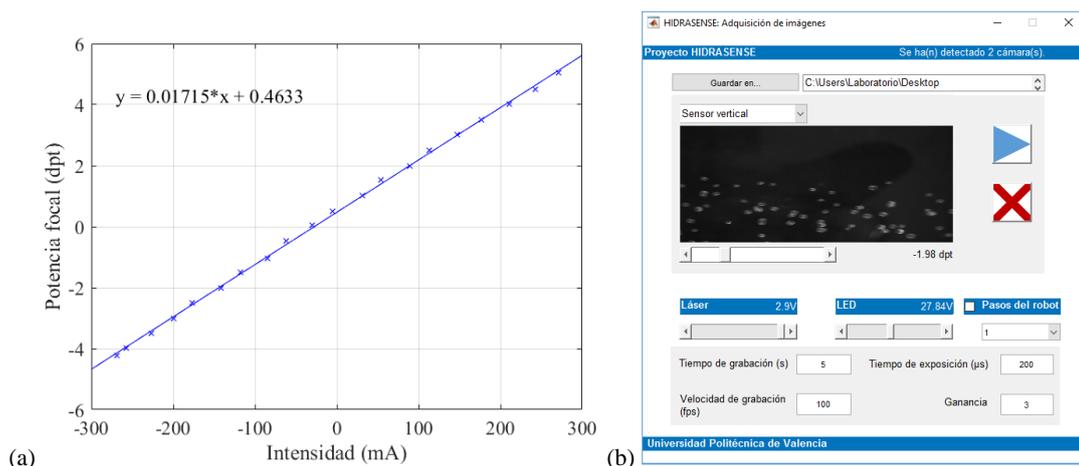


Figura 10: (a) Potencia focal en función de la intensidad proporcionada a la lente; (b) programa de control.

## 4.2 Algoritmos de cálculo de velocidad

En esta sección se describen los distintos métodos usados para el cálculo del perfil de velocidades de las burbujas en base al estado del arte. Para que los algoritmos de cálculo de velocidad obtengan mejores resultados se han utilizado técnicas de filtrado como el algoritmo CLAHE (del inglés, *contrast limited adaptive histogram equalization*) como filtro de pre-procesado. El algoritmo CLAHE es una generalización de la ecualización del histograma y la ecualización del histograma adaptativa [42]. Esta técnica no opera globalmente como ocurre con la ecualización del histograma en la que se busca una función de mapas de intensidad para que el histograma de intensidades resultante sea plano en toda la imagen [43], si no que actúa en pequeñas áreas de la imagen llamados recuadros. De esta forma se mejora el contraste de cada recuadro. Para eliminar los límites artificiales entre los recuadros se hace uso de interpolación bilineal entre los recuadros adyacentes.

Mediante el uso de MATLAB se desarrolla el análisis de velocidades mediante distintos métodos de cálculo. En concreto, nos centramos en los métodos Optical Flow [43], SIFT [26], SURF [27] y BIV [44] que se describen brevemente a continuación.

#### 4.2.1 Método *Optical Flow*

Optical Flow o flujo óptico es un método de cálculo de la distribución de velocidades aparentes de patrones de movimientos del brillo. Este flujo óptico surge del movimiento relativo de los objetos y del observador, por lo que no tiene en cuenta el movimiento del observador [45].

El método de estimación Horn-Schunck [46] es uno de los algoritmos clásicos de flujo óptico por sus buenos resultados y su simplicidad. Este algoritmo se basa en una técnica de computación diferencial que requiere una conservación de brillo con un suavizado global para obtener una estimación de los campos de velocidad. Las estimaciones se componen de un vector de dos dimensiones. El flujo óptico se computa en un punto teniendo en cuenta los puntos adyacentes debido a que el brillo solo tiene una componente y la velocidad tiene dos componentes.

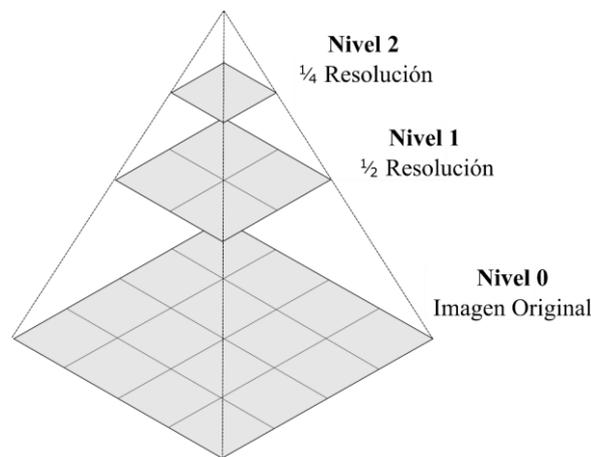


Figura 11: Representación visual de una pirámide de 3 niveles.

Además del método de estimación de flujo óptico, técnicas de procesamiento de imagen pueden mejorar los resultados [47]. Un ejemplo es el uso de la técnica de multi-resolución incremental basado en el método de las pirámides, tal como se muestra en la Figura 11. Con este método se realiza un diezmado iterativo de la imagen original para conseguir diferentes niveles de tamaño, formando una pirámide. El flujo óptico se estima en el nivel inicial de la pirámide (conocido como el núcleo) y el resultado del flujo óptico de cada nivel de la pirámide se usa para corregir la secuencia en el siguiente nivel. El desplazamiento total es la suma de todos los incrementos de movimiento consiguiendo una mayor exactitud. Para el estudio del flujo óptico, se ha hecho uso de una toolbox de MATLAB con algoritmos desarrollados y presentados por Sun et al. [48].

#### 4.2.2 Método *SIFT*

El método SIFT, es uno de los métodos de descriptores locales con más éxito y se basa en la búsqueda de puntos característicos buscando máximos y mínimos locales de diferencias de filtrados gaussianos. Se trata de un método robusto, pero lento. Es un método invariante al escalado y robusto frente transformaciones de imágenes como puede ser rotaciones de planos, cambios de puntos de vista, emborronamiento, cambios de iluminación o ruido gracias a la detección de puntos característicos y los descriptores usados [49].

Los pasos más importantes de computación que lleva a cabo el método SIFT para la identificación de características son:

- Detección de extremos en espacio escalado: la primera fase de la computación busca sobre todas las zonas de la imagen y a diferentes escalas, extremos y bordes. Se implementa eficientemente mediante la utilización de diferencias de filtrados gaussianos para identificar potenciales puntos de interés que permanezcan invariantes en las imágenes.
- Localización de puntos característicos: Para cada una de las zonas candidatas, se seleccionan puntos invariantes basados en medidas de su estabilidad.
- Asignación de la orientación: Se asigna una o más orientaciones a cada una de las localizaciones de los puntos característicos basándose en direcciones de gradientes de imágenes.
- Descriptor del punto característico: Los gradientes de la imagen local se miden en la escala seleccionada en la región alrededor de cada uno de los puntos característicos. El descriptor es un vector de características que es muy diferente en los distintos puntos, pero que es parecido en el mismo punto en distintas imágenes.

Para la implementación del método se ha hecho uso de una librería de código abierto de MATLAB llamada VLFeat [50], donde se implementan algoritmos populares de visión artificial especializados en extracción de características locales y emparejamiento.

### 4.2.3 Método SURF

Bay et. al [27], propusieron el método llamado *Speeded Up Robust Feature* (SURF) como alternativa rápida a otros métodos de descriptores locales como el método SIFT descrito anteriormente (sección 4.2.2), aunque menos robusto [51]. El método SURF lleva a cabo la búsqueda de patrones para el reconocimiento de puntos mediante los siguientes pasos:

- Detección de puntos de interés: Usa una aproximación de la matriz Hessiana básica, lo que hace necesario el uso de imágenes integrales, con lo que se reduce el tiempo de computación drásticamente. Esta detección se consigue siguiendo cuatro pasos:
  - i. Uso de imagen integral.
  - ii. Obtención de puntos de interés basados en la matriz Hessiana.
  - iii. Representación Espacio-Escala.
  - iv. Localización de los puntos característicos.
- Descriptor y correspondencia de puntos característicos: El descriptor se basa en la descripción de la distribución del contenido de intensidad en la proximidad del punto característico. El indexado se basa en el signo del laplaciano, que incrementa la velocidad de las correspondencias. Este proceso se basa en estos tres pasos:
  - i. Asignación de la orientación.
  - ii. Descriptor basado en la suma de respuestas de wavelet de Haar.
  - iii. Indexado rápido para correspondencias.

Las técnicas basadas en el seguimiento de objetos mediante puntos característicos SURF se basan en la extracción de características en un área, para proceder a la búsqueda de las mismas características en la misma área y en un área cercano [52]. Por lo que, al tratarse de imágenes en las que se quiere obtener el movimiento de varios objetos a la vez, se divide el campo de visión del sensor en áreas de menor tamaño para la detección de los distintos objetos en dicha área y se procede a la búsqueda en un área cercana.

#### 4.2.4 Método BIV

El método BIV (del inglés, *bubble image velocimetry*) es una técnica común no intrusiva para la visualización cuantitativa y cualitativa de un flujo [53]. El desplazamiento de las partículas se calcula para agrupaciones mediante la evaluación de la correlación cruzada de muchas subimágenes pequeñas. La correlación obtiene el desplazamiento de grupos de partículas más probable en una línea recta entre la primera y la segunda imagen. El uso de técnicas de BIV para el estudio de la velocidad de flujos multifase es algo común en el procesado digital de imágenes [54]. Las técnicas BIV son una variante de las técnicas PIV (del inglés, *particle image velocimetry*) cuando se aplican a estimación de movimiento de burbujas en flujo multifase [55].

Para el cálculo del perfil de velocidades mediante BIV se ha utilizado el software de MATLAB PIVlab [53]. PIVlab es capaz tanto de calcular la distribución de velocidades de pares de imágenes, como de mostrar y exportar múltiples parámetros del patrón del flujo mediante una interfaz gráfica. Su funcionamiento se basa en el pre-procesado para mejorar la calidad de las imágenes mediante una serie de filtros. Este filtrado incluye un ecualizador adaptativo del histograma, un filtro paso alto de la intensidad que enfatiza la información de la partícula conservando la información en las altas frecuencias y un filtro que limita el valor máximo de la intensidad en escala de grises. Posteriormente se realiza la evaluación de las imágenes, mediante una técnica de búsqueda de patrones estadística entre un área A y un área B.

### 4.3 Demostración experimental

En esta sección se describe el montaje experimental desarrollado en el laboratorio para la caracterización de las burbujas en un flujo multifase con el sensor óptico compuesto del láser diodo, luz de refuerzo LED blanca difusa y sensor CMOS y los algoritmos de procesado desarrollados en este proyecto.

#### 4.3.1 Montajes de laboratorio

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en el laboratorio de Test Óptico II del I.U.I. de Tecnología Nanofotónica de la Universitat Politècnica de València (UPV-NTC) y en los laboratorios de Hidráulica y Obras Hidráulicas de la Universitat Politècnica de València (UPV-IIAMA).

La Figura 12(a) muestra una foto del sensor desarrollado según lo descrito anteriormente en la sección 4.1, compuesto por el láser verde y la lente negativa para divergir el haz láser, además del led y de la cámara con el sensor CMOS y la lente plástica sintonizable montados sobre un raíl sobre el que el sensor se desliza para poder medir a distintos calados.

En primer lugar, la evaluación experimental del sensado de burbujas en columna de agua para la caracterización física del flujo se realizó en los laboratorios UPV-NTC utilizando un tanque de metacrilato de unas dimensiones de 40×60×5 cm y un difusor de aire para generar las burbujas. Este primer montaje experimental se muestra en la Figura 12(b). La velocidad de las burbujas del difusor de aire a la presión usada se calculó mediante el procedimiento descrito en la subsección 4.3.5 haciendo uso de la función *Data Cursor*, obteniendo la posición de la misma burbuja en dos fotogramas contiguos y calculando el movimiento producido. Se obtuvo un rango de velocidades entre 28.25 cm/s y 32.94 cm/s.

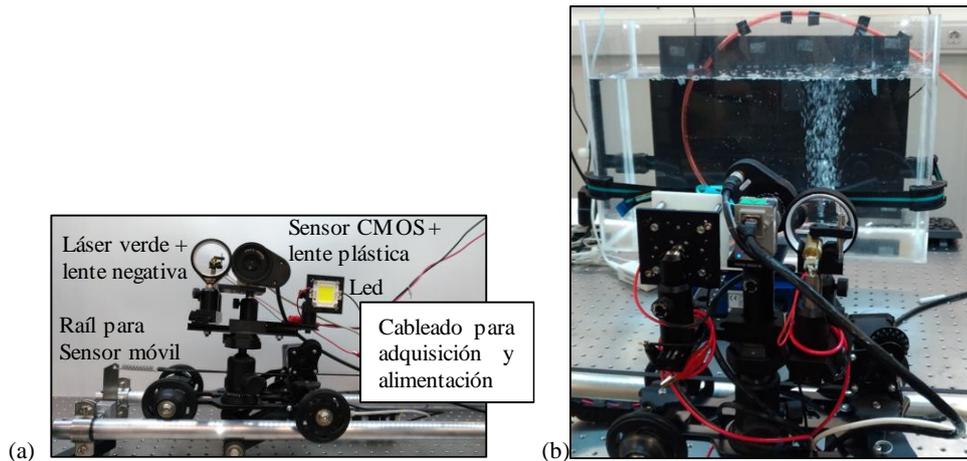


Figura 12: (a) Sensor para el cálculo de velocidad, (b) montaje en los laboratorios UPV-NTC para la caracterización física de columna de agua.

En segundo lugar, se instaló el sensor óptico propuesto en el canal super-crítico de los laboratorios UPV-IIAMA para demostrar la utilidad del sensor en flujos similares a los encontrados en una presa hidráulica. En la Figura 13(a) se puede observar el montaje experimental del sensor en el canal supercrítico descrito anteriormente en la sección 4.1.2, mientras que en la Figura 13(b) puede observarse el sensor en funcionamiento interactuando con burbujas.

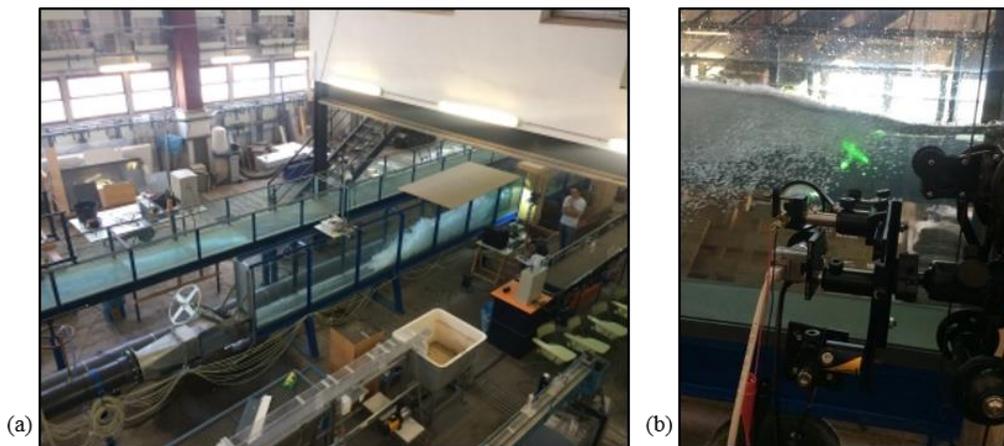
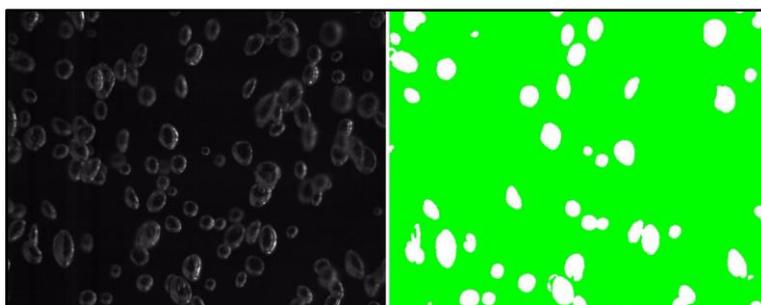


Figura 13: (a) Montaje experimental en el canal supercrítico de los laboratorios UPV-IIAMA; (b) Ejemplo de adquisición de imágenes del sensor.

#### 4.3.2 Caracterización física de las burbujas

Se realiza una serie de experimentos en los laboratorios del UPV-NTC para la caracterización física de las burbujas producidas por el dispersor de aire en columna de agua. Para ello, se capturaron 500 fotogramas a una velocidad de grabación de 100 fotogramas por segundo y un tiempo de exposición de  $200 \mu\text{s}$ .

Para la caracterización física de las burbujas no se tienen en cuenta todas las burbujas que se encuentran en el fotograma, debido que algunas burbujas colisionan con otras burbujas y se detectarían los cúmulos de burbujas como solo una burbuja dando lugar a datos erróneos, por ello se realiza un procesamiento para eliminar todas las burbujas o partículas que producirían dichos errores como se puede observar en la Figura 14 y se analizan sólo las burbujas restantes.



**Figura 14: Fotograma en los laboratorios UPV-NTC antes del procesado y tras el procesado.**

A partir del procesado de los fotogramas capturados, se realiza un análisis estadístico del área equivalente, diámetro equivalente, semieje mayor y menor, solidez, excentricidad y perímetro de las burbujas obteniendo los resultados de la Tabla 3. Además, el sensor también calcula la concentración de aire, obteniendo unos resultados que varían entre un 10 y un 14% para el difusor de aire. Más información se puede encontrar en el artículo descrito en el Anexo C.

**Tabla 3: Resultados caracterización física de las burbujas en los laboratorios de UPV-NTC.**

Variable\Estadístico	Media	Mínimo	Máximo	Rango	Des. Típica
Área equivalente (mm <sup>2</sup> )	2.35	0.20	5.21	5.01	1.34
Diámetro equivalente (mm)	1.78	0.82	2.64	1.82	0.46
Semieje mayor (mm)	2.16	0.90	3.58	2.69	0.70
Semieje menor (mm)	1.66	0.76	2.41	1.65	0.38
Solidez (ad)	0.91	0.82	0.98	0.15	0.05
Excentricidad (ad)	0.68	0.36	0.94	0.57	0.15
Perímetro (mm)	6.15	2.66	10.16	7.50	1.84

### 4.3.3 Comparativa de algoritmos de cálculo de velocidad

En primer lugar, se llevaron a cabo ensayos en los laboratorios de UPV-NTC para comparar los distintos algoritmos para el cálculo de velocidad en columna de agua (Optical Flow, SIFT y SURF). Para ello, se giró la cámara 90 grados para que el eje del sensor con mayor cantidad de píxeles fuera paralelo a la dirección de las burbujas en columna de agua como se puede observar en la Figura 12(b), de tal manera que la misma burbuja permanezca más tiempo en el campo de visión de la cámara, para poder evaluar su velocidad.

La principal diferencia que se puede observar entre los tres métodos es que el método Optical Flow realiza la estimación de movimiento en cada pixel basándose en la constancia de la intensidad luminosa, por lo que da a lugar a un mayor rango de velocidades medidas que el SIFT y SURF debido a la homogeneidad de los objetos a detectar y a la estimación de movimiento de todos los objetos en el fotograma, no sólo las burbujas. Los métodos SIFT y SURF no realizan una detección de movimiento pixel a pixel, si no que realizan una búsqueda de los puntos característicos que puedan resultar más interesantes y efectúan un seguimiento sin tener en cuenta las zonas de la imagen sin movimiento, por lo que se obtiene un intervalo de velocidades más reducido.

En la Figura 15(b) se muestra la estimación del flujo óptico mediante el uso de la técnica de multi-resolución del método de las pirámides de 7 niveles en cada punto de la imagen, donde la intensidad del pixel representa la cantidad de movimiento de un fotograma al siguiente y en la Figura 15(a) se muestra una de las imágenes originales sobre la que se ha efectuado el cálculo de velocidad.

## Técnica A: Cálculo de la velocidad de burbujas en flujos multifase mediante iluminación láser y procesamiento digital

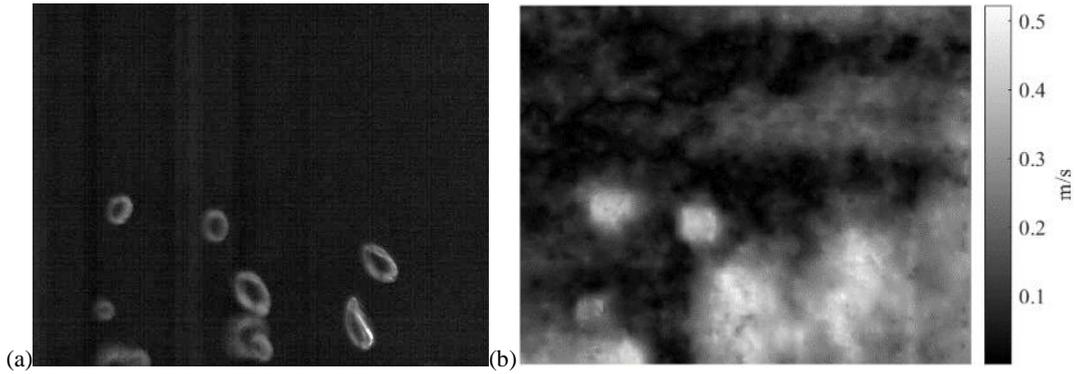


Figura 15: Estimación del flujo óptico en un fotograma capturado con burbujas generadas con un dispersor de aire en los laboratorios UPV-NTC.

En la Figura 16 se puede observar un ejemplo de los puntos característicos detectados en dos fotogramas contiguos mediante el método SIFT de un flujo multifase generado con un dispersor de aire en los laboratorios UPV-NTC. Mientras que en la Figura 17 se puede observar el mismo ejemplo mediante el método SURF. En ambos casos en los dos fotogramas contiguos se muestran los puntos característicos representados por círculos rojos en el primer fotograma y con cruces verde en el segundo fotograma. Las correspondencias están representadas con una línea amarilla. Se puede observar que además de encontrar las correspondencias reales, también detecta falsos positivos dando lugar a errores.

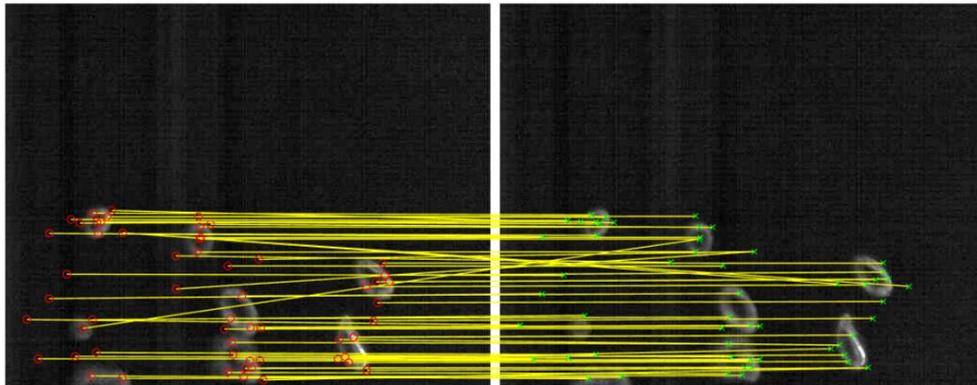


Figura 16: Correspondencias detectadas mediante el método SIFT entre dos fotogramas con el dispersor de aire de los laboratorios de UPV-NTC.

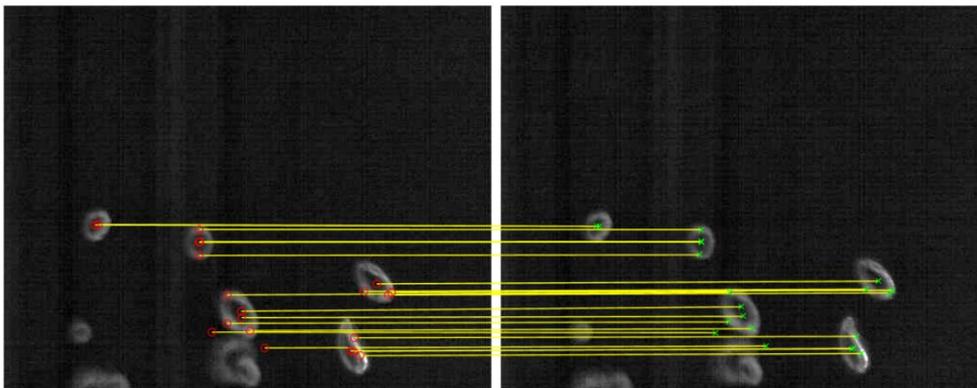


Figura 17: Correspondencias detectadas mediante el método SURF entre dos fotogramas de un flujo multifase generado con el dispersor de aire en los laboratorios UPV-NTC.

#### 4.3.4 Resultados experimentales del cálculo de velocidad en columna de agua

A continuación, se procedió al cálculo de la velocidad en los laboratorios UPV-NTC para la prueba de funcionalidad de los algoritmos, así como la caracterización de burbujas en columna de agua.

Para el cálculo de velocidad se hizo uso de los parámetros especificados en la Tabla 4. La velocidad de grabación se configuró a 1110 fps, ya que, a mayor número de fotogramas por segundo, se obtienen mejores resultados en el cálculo de la velocidad, porque el movimiento de las burbujas entre fotogramas es menor y se modifica menos su forma. Para poder aumentar el número de fotogramas por segundo es necesario reducir la región de interés para evitar la pérdida de datos en la adquisición de imágenes. Para el análisis del resto de características físicas de las burbujas no es necesario la reducción de la región de interés, ya que no es esencial que la velocidad de grabación sea tan alta, por lo que para la completa caracterización física de las burbujas se realiza, primero, una adquisición de imágenes a una velocidad de grabación más reducida con una región de interés mayor para calcular el tamaño y la concentración y tras ello se realiza una captura de 150 fotogramas a una velocidad de grabación mayor y con una región de interés menor para la estimación de la velocidad.

Tabla 4: Parámetros entrada sensor para la adquisición de imágenes para el cálculo de velocidad.

Parámetros de adquisición de imágenes	
Velocidad	1110 fps
Ganancia	5
Tiempo de exposición	100 $\mu$ s
Región de interés	512 $\times$ 409 píxeles

En base al estado del arte se calculó la velocidad en columna de agua en los laboratorios UPV-NTC mediante el método BIV como se puede observar en la Figura 18, obteniendo unos resultados de velocidades entre 0 y 25 cm/s. Se puede observar que el error es muy alto, ya que, a pesar de incluir filtros de procesamiento (filtro CLAHE, filtro paso alto y filtro Wiener), las burbujas no se detectan correctamente como partículas. Con el método BIV, se comete un error de un 60%, ya que la velocidad real de las burbujas en el flujo en columna de agua para este caso es de aproximadamente 30 cm/s. Por este motivo se descartó el uso del método BIV, y se realizó el cálculo de las velocidades con los otros tres métodos.

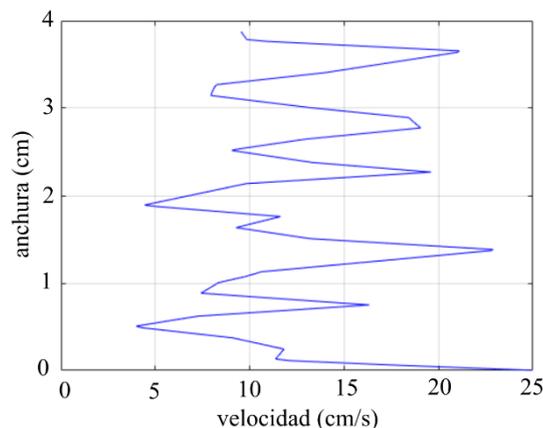


Figura 18: Velocidades obtenidas mediante método BIV con el sensor óptico propuesto en columna de agua generada con difusor de burbujas en los laboratorios NTC-UPV.

Los resultados obtenidos en el laboratorio de UPV-NTC con el difusor de aire se resumen en la Figura 19 representando un histograma tridimensional para cada uno de los algoritmos

## Técnica A: Cálculo de la velocidad de burbujas en flujos multifase mediante iluminación láser y procesamiento digital

implementados para el cálculo de velocidad con el mismo número de columnas para cada uno de los tres métodos.

En la Figura 19 se representa una velocidad de las burbujas de entre 0.2 a 0.6 m/s. El mayor número de casos se da entre los 0.24 y los 0.36 m/s lo que se corresponde con la velocidad lineal de las burbujas con el difusor utilizado.

Una de las diferencias más significativas entre los tres métodos es el tiempo de computación necesario para analizar los mismos fotogramas con cada uno de los métodos. Mientras que el método Optical Flow piramidal tarda 2.8793 segundos en analizar cada fotograma, el método SIFT tarda 0.5942 segundos por fotograma y el método SURF tarda 0.0582 segundos por fotograma; siendo el método SURF el más rápido.

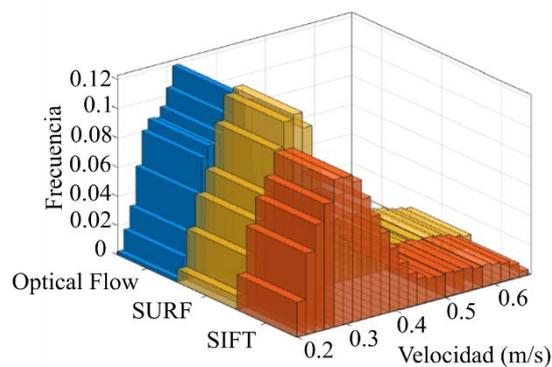


Figura 19: Histograma de velocidades calculado con diferentes algoritmos y el sensor óptico propuesto en columna de agua generada con difusor de burbujas en los laboratorios NTC-UPV.

### 4.3.5 Resultados experimentales del cálculo de velocidad en flujos supercríticos

La validación experimental de la estimación de velocidad para flujos de burbujas a altas velocidades se realizó en el canal hidráulico super-crítico de los laboratorios UPV-IIAMA. Se analizaron siete configuraciones diferentes para el cálculo de los perfiles de velocidad variando los caudales de la bomba hidráulica para un mismo calado. Para comparar los datos obtenidos con el sensor propuesto, en primer lugar, se calculó de forma teórica la velocidad lineal del flujo en función de los parámetros de la bomba y del calado, definiendo siete configuraciones entre 2.5 y 5.5 m/s en pasos de 0.5.

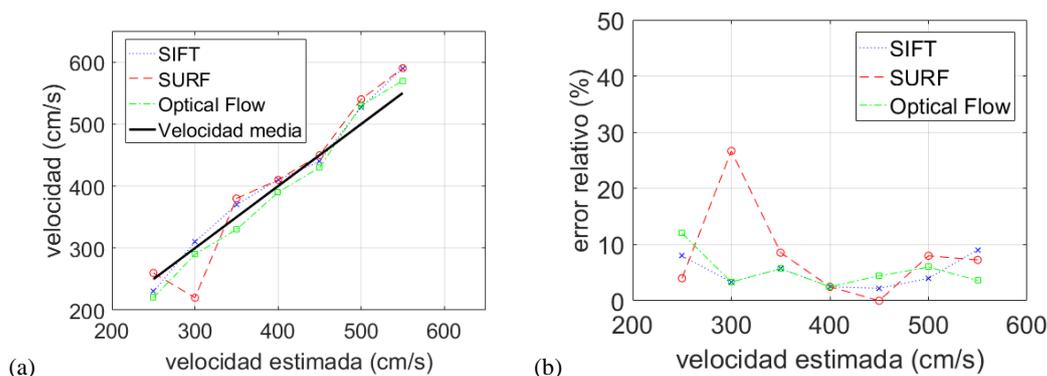
En la Figura 20(a) se pueden observar la moda de los resultados obtenidos para cada uno de los ensayos realizados. En la Figura 20(b) se puede observar el error relativo de la moda de la velocidad estimada para cada uno de los ensayos efectuados, calculado mediante la siguiente ecuación:

$$Error\ relativo\ (\%) = \frac{|Valor\ medido - Valor\ exacto|}{Valor\ exacto} \times 100 \quad (4.2)$$

Se puede observar que el error es similar mediante los tres métodos para los distintos ensayos llevados a cabo, siendo en general inferior a un 10%, excepto en un caso, que mediante el método SURF para una velocidad estimada de 300 cm/s supera el 20% de error, esto puede ser debido a algún valor erróneo calculado, que, al analizar pocos fotogramas y pocas correspondencias, haya afectado considerablemente a la medida. Además, se tiene que tener en cuenta que la velocidad media estimada es una aproximación obtenida a partir de los caudales de la bomba hidráulica y

del calado del canal y mientras que el caudal de la bomba hidráulica no varía, el calado fluctúa constantemente con el flujo, variando asimismo la velocidad media del flujo.

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 21 dónde se muestra el perfil de velocidad del canal supercrítico para un calado de 8.5 cm, es decir, con una distancia desde el fondo del canal a la superficie de 8.5 cm. El perfil de velocidad se ha calculado para una altura desde 5.8 cm a 8.5 cm, debido a que es la zona aireada del flujo y es dónde es posible realizar el cálculo de la velocidad. Cabe destacar, que la velocidad de las burbujas es distinta en función de la altura de dicha burbuja en el flujo multifase.



**Figura 20: Datos de velocidad por los métodos: SIFT, SURF y Optical Flow piramidal: (a) moda; (b) error en base a la velocidad media estimada.**

De las gráficas mostradas en la Figura 21, se puede observar que la velocidad calculada con los tres métodos es similar, aunque no es exactamente igual, tanto en media como en moda, ello puede deberse a:

- La existencia de partículas o ítems en suspensión que altere los patrones de brillo estructurados, dificultando la estimación por el método piramidal del Optical Flow.
- La desaparición de burbujas al situarse detrás de otras burbujas, que puede llevar a búsqueda de patrones inexistentes.
- Una concentración muy reducida de burbujas, que puede conllevar a una mayor cantidad de datos erróneos, debido a correspondencias realizadas por ruido y no burbujas.

En la Tabla 5 se resumen los datos de velocidad obtenidos, incluyendo la velocidad media y la moda de la velocidad en el canal supercrítico para cada uno de cálculo.

**Tabla 5: Datos de velocidad de los experimentos llevados a cabo en los laboratorios de UPV-IIAMA.**

Experimento		Nº1	Nº2	Nº3	Nº4	Nº5	Nº6	Nº7
<b>Velocidad estimada</b>		250	300	350	400	450	500	550
<b>Velocidad por método SIFT (cm/s)</b>	Moda	230	310	370	410	440	520	600
	Media	230	304	365	407	440	527	590
<b>Velocidad por método SURF (cm/s)</b>	Moda	260	271	380	410	450	540	590
	Media	231	307	359	408	449	541	577
<b>Velocidad por método Optical Flow (cm/s)</b>	Moda	220	290	332	390	430	530	570
	Media	220	291	330	390	430	530	571

## Técnica A: Cálculo de la velocidad de burbujas en flujos multifase mediante iluminación láser y procesamiento digital

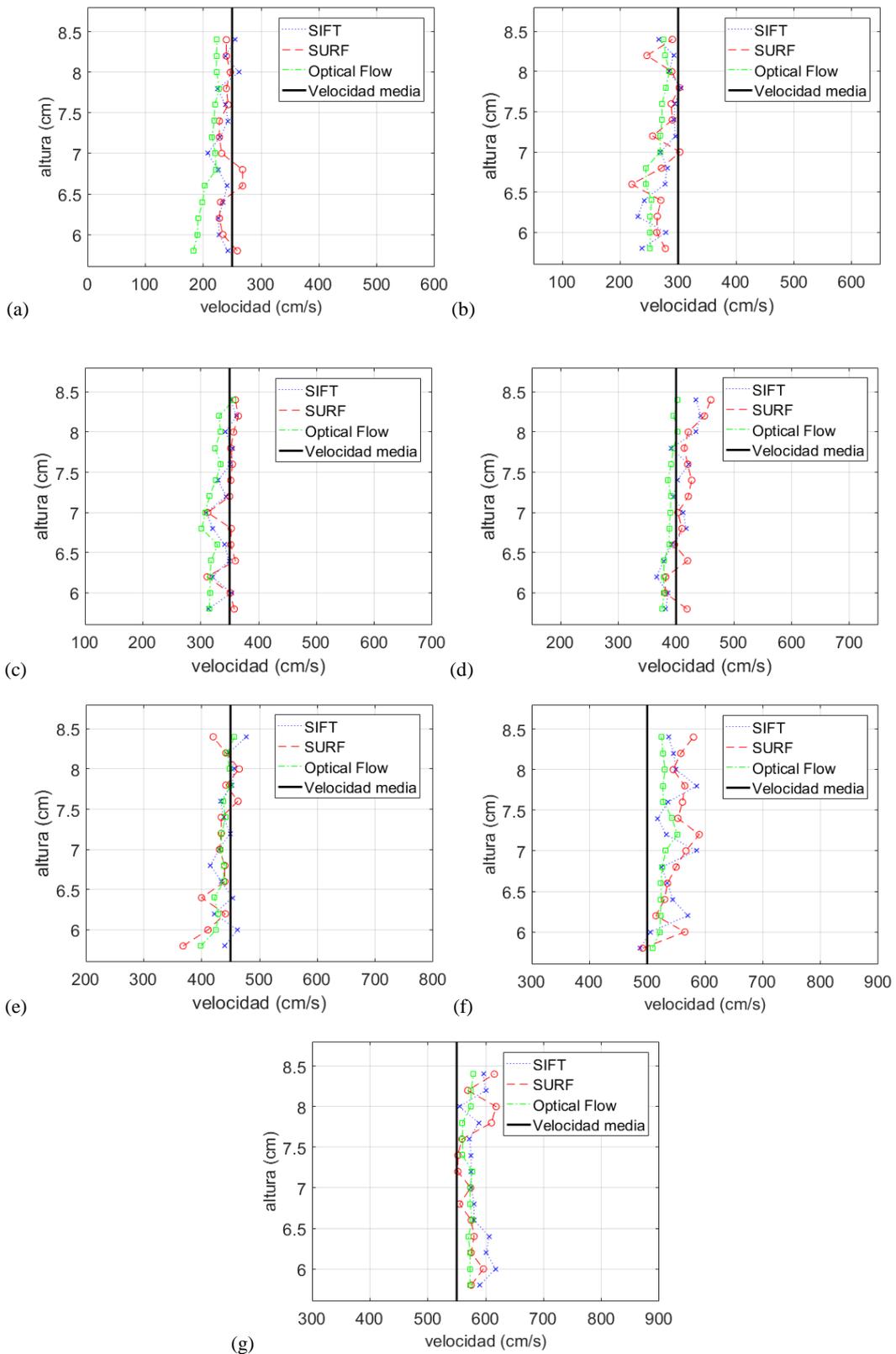


Figura 21: Perfil de velocidad en función del calado para el canal supercrítico de los laboratorios UPV-IIAMA con velocidad media de: (a) 2.5 m/s; (b) 3 m/s; (c) 3.5 m/s; (d) 4 m/s; (e) 4.5 m/s; (f) 5 m/s; (g) 5.5 m/s.

Como el valor teórico de velocidades puede contener error respecto al calado experimental, se calculó el error de la velocidad mediante la captura de dos fotogramas consecutivos y se midió el movimiento de las burbujas en píxeles. Para ello, se hizo uso del *Data Cursor* de MATLAB y se seleccionó la posición de la misma burbuja en los dos fotogramas como se muestra en los ejemplos de la Figura 22.

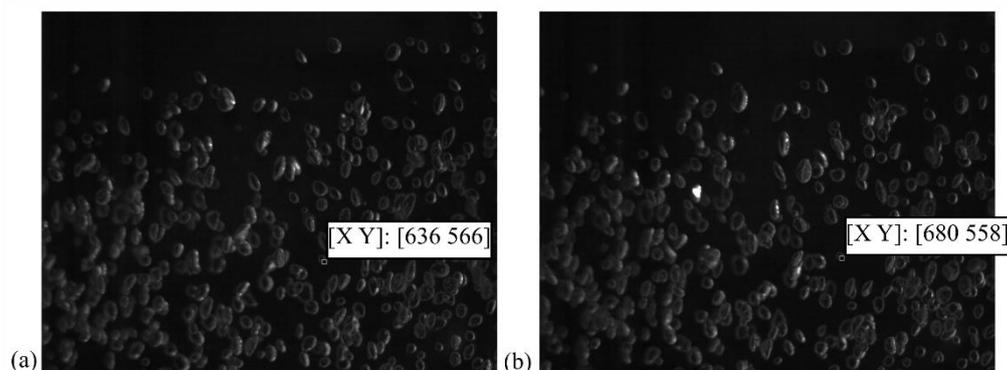


Figura 22: Posición burbuja: (a) en el primer fotograma; (b) en el segundo fotograma.

El procedimiento se realizó para dos burbujas distintas obteniendo los resultados de la Tabla 6. También se pueden observar los errores asociados a cada uno de los métodos con respecto a la velocidad media obtenida de las dos burbujas.

Tabla 6: Resultados de velocidades de las burbujas y los errores asociados a los tres métodos.

Experimento		Nº1	Nº2	Nº3	Nº4	Nº5	Nº6	Nº7
Velocidad primera burbuja (cm/s)		239	286	338	381	462	508	580
Velocidad segunda burbuja (cm/s)		238	278	366	405	431	548	575
Velocidad media burbujas (cm/s)		238.5	282	352	393	446.5	528	577.5
Error método SIFT (%)	Moda	3.57	9.92	5.11	4.33	1.46	1.51	3.90
	Media	3.57	7.80	3.69	3.56	1.46	0.19	2.16
Error método SURF (%)	Moda	9.01	3.90	7.95	4.32	0.78	2.27	2.16
	Media	3.14	8.86	1.98	3.82	0.56	2.46	0.09
Error método Optical Flow (%)	Moda	7.75	2.84	5.68	0.76	3.70	0.38	1.30
	Media	7.76	3.19	6.25	0.76	3.70	0.38	1.13

#### 4.4 Discusión de resultados

Los resultados de esta sección muestran la estimación de movimiento de un flujo multifase mediante técnicas de tratamiento digital de imagen mediante tres métodos distintos (Optical flow piramidal, SIFT y SURF). El método que menor error produce en la estimación de movimiento es el Optical Flow con pirámide multi-resolución de siete niveles, aunque los resultados son similares para los tres métodos. El método que más error produce se trata del método SURF, y esto puede ser debido a que, al adquirir simplemente 150 fotogramas, cómo es el método que menos correspondencias encuentra, los falsos verdaderos encontrados, es decir, los puntos característicos emparejados que realmente no se tratan del mismo punto, afectan más a las medidas.

A pesar de producir un error mayor, el método SURF resulta ser el más eficiente computacionalmente, ya que es 49 veces más rápido que el método Optical Flow con pirámide multi-resolución de siete niveles y 10 veces más rápido que el método SIFT.

## Capítulo 5. Técnica B: identificación de partículas mediante determinación del ángulo crítico

En este capítulo se describe la tecnología de sensado propuesta para la identificación de partículas mediante la determinación del ángulo crítico de un haz láser. A continuación, se describen las simulaciones realizadas para la validación de la tecnología y se describe el algoritmo desarrollado para la detección y determinación del ángulo crítico.

### 5.1 Principios fotónicos de propagación láser

En esta sección se describen los principios fotónicos necesarios para la comprensión de la propagación láser entre dos medios con diferente índice de refracción. Para ello, se introducen los conceptos de reflexión y transmisión de una onda plana incidente a una superficie, se resumen las leyes de Snell y de Fresnel (definiendo los conceptos de ángulo crítico y de reflexión total interna) y se introduce el efecto Goos-Hänchen.

#### 5.1.1 Ley de Snell

La refracción es un fenómeno físico por el cual una onda electromagnética cambia su dirección un determinado ángulo  $\theta$  como consecuencia de un cambio en la velocidad en su medio de propagación. Se define el índice de refracción absoluto ( $n$ ) como [56]:

$$n = \frac{v}{c} \quad (5.1)$$

Siendo:

- $n$ , el índice de refracción del medio.
- $v$ , velocidad de la onda electromagnética en el medio que se propaga.
- $c$ , velocidad de la luz en el vacío.

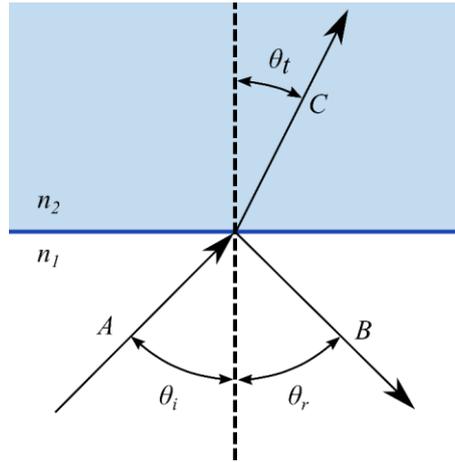
Como no existe nada que se desplace más rápido que la luz en el vacío,  $n$  nunca será menor a 1. La ley que describe este fenómeno se conoce como Ley de Snell, desarrollada en el siglo XVII por el matemático Willebrord Snel van Royen. Asumiéndose que  $n_1$  es el índice de refracción del material de la onda incidente,  $n_2$  es el índice de refracción del material de la onda refractada y que los ángulos de incidencia, reflexión y transmisión son  $\theta_i$ ,  $\theta_r$  y  $\theta_t$  respectivamente, Snell describió la ley de la refracción como:

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad (5.2)$$

Sabiendo que según la ley de reflexión el ángulo de incidencia es igual al de reflexión:

$$\theta_i = \theta_r \quad (5.3)$$

En la Figura 23 se muestra una representación gráfica de la relación entre los ángulos de incidencia, reflexión y transmisión especificados mediante la ley de Snell.



**Figura 23:** Haz incidente que se transmite y se refleja.

Además, cabe destacar que el índice de refracción no es un número real, sino un número complejo [57] cuya parte imaginaria se describe como el coeficiente de extinción ( $\kappa$ ):

$$\hat{n} = n + i\kappa \quad (5.4)$$

Directamente relacionado con la ley de Beer-Lambert [58] para el cálculo del coeficiente de absorción ( $\alpha$ ) de onda electromagnética en un medio:

$$\alpha = \frac{4\pi}{\lambda} \kappa \quad (5.5)$$

### 5.1.2 Ley de Fresnel

Mientras que la relación entre los ángulos de la onda incidente, reflejada y transmitida están especificados mediante la ley de Snell, las fórmulas de Fresnel determinan la relación entre la amplitud y la fase de las tres ondas [59]. Normalmente, el coeficiente de reflexión de Fresnel determina la relación entre la amplitud compleja B de la onda reflejada y la onda incidente, mientras que el coeficiente de transmisión de Fresnel indica la relación compleja C entre la onda transmitida y la incidente como se muestra en la Figura 23. Estos coeficientes dependen del ángulo de incidencia y de la polarización de la luz. Calculándose sus valores cuando el campo eléctrico es perpendicular al plano de incidencia (forma más común) como [60]:

$$r_{TE} = \frac{\sin(\theta_t - \theta_i)}{\sin(\theta_t + \theta_i)} \quad (5.6)$$

$$t_{TE} = \frac{2 \sin(\theta_t) \cos(\theta_i)}{\sin(\theta_t + \theta_i)} \quad (5.7)$$

En la Figura 24 se puede observar los coeficientes de reflexión dados por las ecuaciones de Fresnel para dos medios con índices de refracción  $n_1 = 1.5$  y  $n_2 = 1$ , donde a partir de un cierto ángulo (conocido como ángulo crítico) el coeficiente de reflexión toma el valor de uno, y se produce reflexión total interna.

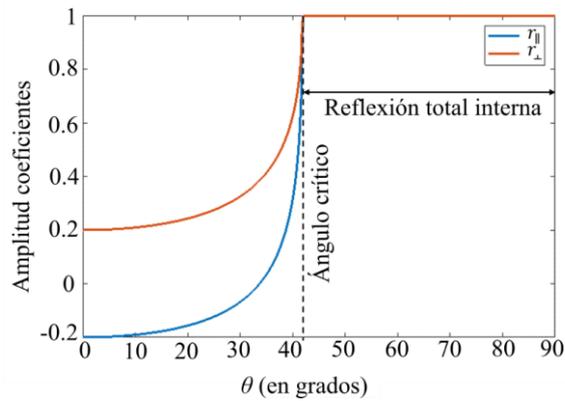


Figura 24: Coeficientes de reflexión en función del ángulo de incidencia para  $n_1=1.5$  y  $n_2=1$ .

### 5.1.3 Ángulo crítico

En el caso de que el medio por el que se propaga el rayo incidente con una longitud de onda  $\lambda$  posea un índice de refracción mayor que el del medio en que se reflejará y cuando el ángulo de incidencia  $\theta_i$  sea superior al ángulo crítico ( $\theta_c$ ); el rayo no cambiará de medio ya que  $\theta_i > \theta_c$  y se producirá el fenómeno de la reflexión total interna (TIR). El valor del ángulo crítico se calcula como [61]:

$$\theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (5.8)$$

### 5.1.4 Reflexión total interna

Cuando el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo crítico  $\theta_i > \theta_c$ , toda la energía vuelve al primer medio y se produce el fenómeno TIR. Como  $n_1 \sin(\theta_i) > n_2$  el coeficiente de reflexión deja de ser real, indicando que el haz láser sufre un cambio de fase que es dependiente de la polarización [59].

En la Figura 25 se puede observar como al aumentar  $\theta_i$ , el rayo transmitido cada vez es más débil hasta que este se desvanece y el reflejado transporta toda la energía. Siendo la intensidad del haz láser representada en función del valor de intensidad del color. Cuanto más claro el color, el haz es menos intenso y cuanto más oscuro, mayor intensidad.

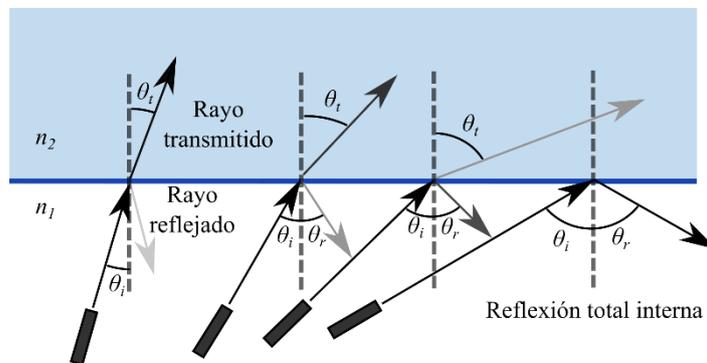


Figura 25: Reflexión según el ángulo de incidencia para dos medios con índice de refracción  $n_1$  y  $n_2$ .

### 5.1.5 Efecto Goos-Hänchen

En los apartados anteriores, se asume que la luz se refleja en el punto de incidencia, lo que solamente produce un cambio de fase. Pero, en realidad, esta suposición no es exacta, y en 1947, Goos y Hänchen demostraron experimentalmente que la luz linealmente polarizada sufre un pequeño desplazamiento cuando se produce el fenómeno TIR. Dicho desplazamiento puede ser evaluado cuantitativamente por la siguiente fórmula [59]:

$$D = \frac{cn_2\lambda}{\sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2}} \quad (5.9)$$

Dónde  $c$  es una constante,  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción de cada uno de los medios y  $\lambda$  es la longitud de onda. La física detrás del fenómeno es que un haz láser tiene una cierta anchura espectral, por lo que un haz de anchura finita es la superposición de infinitas ondas planas con una pequeña variación en el ángulo de incidencia, y estas ondas planas interfieren entre ellas. En la Figura 26 se puede observar un diagrama de rayos representando el desplazamiento producido por el efecto Goos-Hänchen.

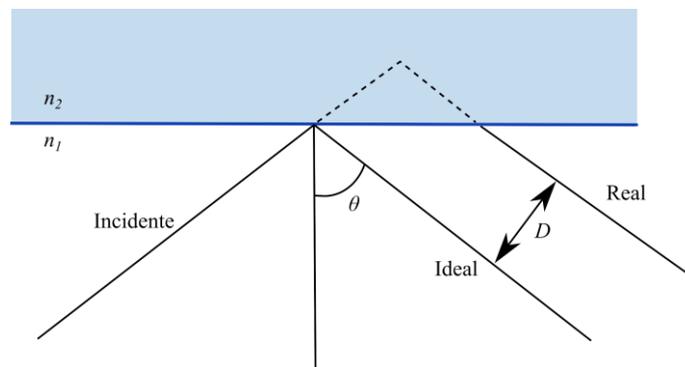


Figura 26: Efecto Goos-Hänchen.

## 5.2 Estudio ángulo crítico de un haz láser interactuando con diferentes sustancias

En este apartado se reportan los resultados de las simulaciones realizadas para estudiar el cálculo del ángulo de incidencia necesario para que se produzca el efecto de la reflexión total interna cuando un haz láser entra en contacto con distintas sustancias.

### 5.2.1 Software de simulación

Las simulaciones se realizaron mediante el software COMSOL Multiphysics 5.2, haciendo uso del módulo de *Ray Optics*. Dicho módulo sirve para el modelado de la propagación de ondas electromagnéticas en sistemas en los que la longitud de onda es mucho menor que el detalle geométrico más pequeño del modelo. Dado que no es necesario resolver la longitud de onda con una malla de elementos finitos, las trayectorias de los rayos se pueden calcular a lo largo de distancias largas, con un coste computacional bajo.

### 5.2.2 Modelo electromagnético para propagación de ondas

El modelado electromagnético para la propagación de ondas del módulo de *Ray Optics* trata las ondas como rayos, teniendo en cuenta los efectos de reflexión y refracción en los límites de distintos medios. La intensidad de los rayos láser se computa haciendo uso de los parámetros de Stokes, mientras que los coeficientes de reflexión y transmisión se calculan haciendo uso de las ecuaciones de Fresnel.

## Técnica B: identificación de partículas mediante determinación del ángulo crítico

Para la realización de la simulación se generó una geometría similar al montaje experimental usado para las medidas, que contuviera un prisma acrílico con un índice de refracción de  $n_{prisma} = 1.4970$ , un láser y una burbuja de forma semiesférica con distintos índices de refracción dependiendo de la sustancia a representar. La simulación se realizó a una longitud de onda de 633 nm y el ángulo del haz láser emergente del láser se modificó en función de la sustancia para la búsqueda del ángulo crítico.

En este caso, las sustancias que se estudiaron en la simulación fueron: agua, aire, etanol y vapor de agua, utilizando los índices de refracción mostrados en la Tabla 7 para la evaluación del ángulo crítico. En el Anexo A se puede observar información más detallada sobre los índices de refracción usados para la simulación.

**Tabla 7: Datos del índice de refracción usados en las simulaciones.**

Índice de refracción	Valor
Agua	1.33170
Aire	1.00027
Etanol	1.35940
Vapor de agua	1.00018

### 5.2.3 Resultados de simulación

En la Figura 27 se muestran los resultados de las simulaciones realizadas para las distintas sustancias. En este estudio se ha considerado que las gotas de agua o de etanol están situadas en un medio global compuesto por aire, mientras que en el caso de burbujas de aire o de vapor de agua el medio global que envuelve la burbuja es agua. Se puede observar que la diferencia del ángulo incidente para que se produzca la reflexión total interna para las distintas sustancias es significativa excepto en el caso del aire y del vapor de agua, debido a que su índice de refracción es idéntico hasta la cienmilésima parte. Esto dificulta la diferenciación de burbujas de aire y de vapor de agua con este método.

En el caso de que el ángulo sea inferior al ángulo crítico de cada sustancia, no se producirá la reflexión total interna, sino que se transmitirá al segundo medio. Pero, según sea más próximo el ángulo de incidencia con respecto a la normal al ángulo crítico, mayor será la reflexión y menor la transmisión al segundo medio, como se ha explicado anteriormente en la sección 5.1.2. Como se muestra en la Figura 28(a), para el caso del etanol con un ángulo de  $65.2407^\circ$  (valor muy próximo al ángulo crítico), el haz incidente se refleja en su mayoría, excepto en una parte que se transmite para volver de nuevo a transmitirse por el prisma.

En el caso de la burbuja de aire, cuando el ángulo de incidencia sea el correspondiente al crítico y no se detecte burbuja, el haz se transmitirá en su totalidad al segundo medio (en este caso agua), debido a que el índice de refracción del agua es mayor que el del aire. En este caso el ángulo de incidencia necesario para que se refleje el haz debe ser mayor. En la Figura 28(b) se muestra un ejemplo del haz transmitido al segundo medio cuando no se detecta burbuja.

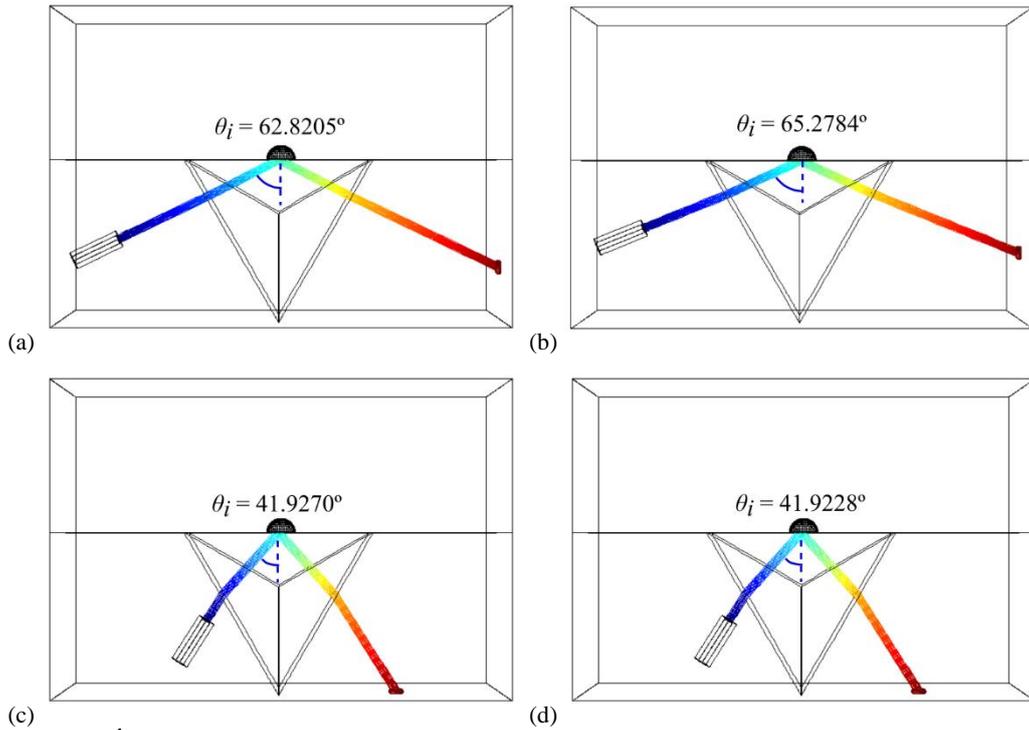


Figura 27: Ángulo crítico: (a) para el agua; (b) para el etanol; (c) para el aire; (d) para el vapor de agua.

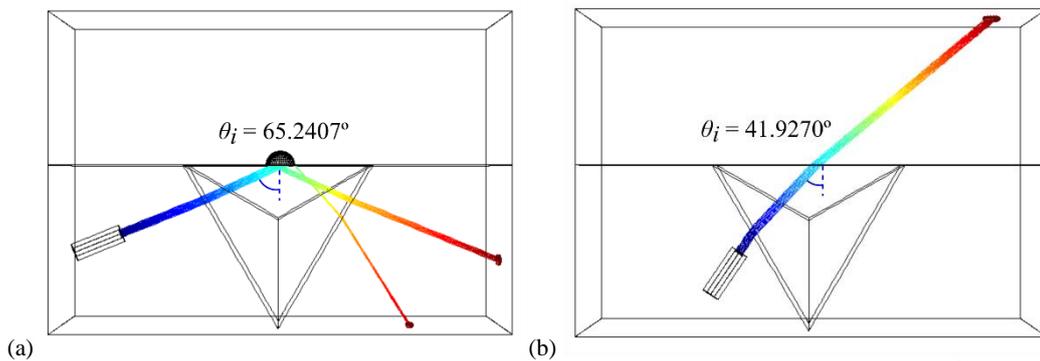


Figura 28: (a) Haz incidente con ángulo próximo al crítico para una burbuja de etanol; (b) Ángulo de incidencia ajustado al ángulo crítico para el aire sin burbuja.

### 5.3 Demostración experimental

En esta sección se describe el montaje experimental para el cálculo del índice de refracción de las sustancias bajo estudio, los algoritmos desarrollados para la identificación química de las sustancias y los resultados obtenidos. En este caso, se propone el uso de un prisma equilátero para que se produzca reflexión cuando el haz láser incide sobre una burbuja de un medio con un índice de refracción menor produciendo el fenómeno TIR cuándo el ángulo de incidencia es superior al ángulo crítico [62], tal como se describe en la Figura 29.

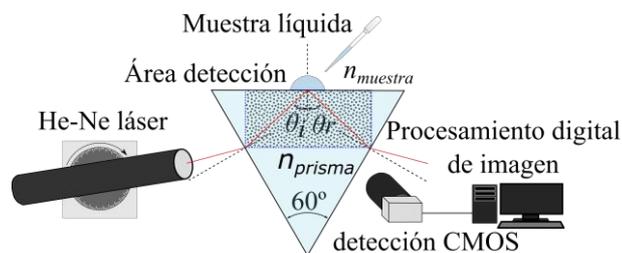


Figura 29: Diagrama experimental del sensor propuesto para el análisis químico de muestras.

## Técnica B: identificación de partículas mediante determinación del ángulo crítico

Para poder realizar la identificación química y calcular el índice de refracción de la sustancia es necesario saber el índice de refracción del prisma  $n_{prisma}$  y el ángulo crítico  $\theta_c$ .

### 5.3.1 Montaje de laboratorio

La identificación cromatográfica de muestras puede llevarse a cabo en caso de conocerse el índice de refracción  $n_1$  y de  $\theta_c$ . Con tal fin, se emplearon los siguientes componentes mecánicos, ópticos y electrónicos:

- Mount de rotación de alta precisión (goniómetro) y plataforma de traslación en tres ejes:

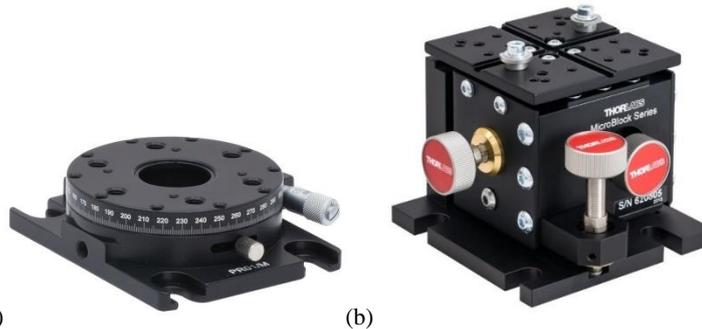


Figura 30: (a) Mount de rotación PR01/M de Thorlabs; (b) plataforma de traslación en tres ejes MBT602/M de Thorlabs.

- Láser verde ( $\lambda=532$  nm) de tipo diodo y láser rojo (633 nm) He-Ne:

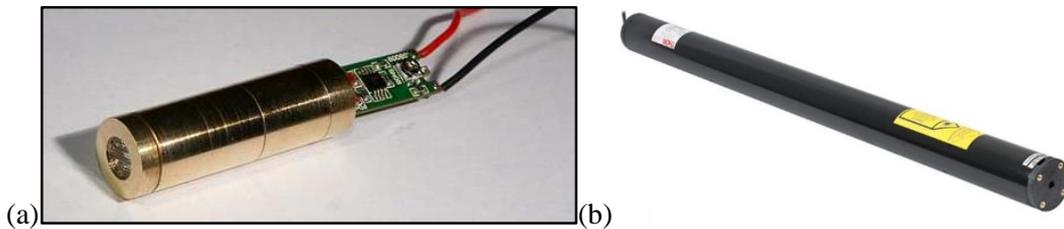


Figura 31: (a) Láser verde tipo diodo; (b) Láser JDSU 1135P de He-Ne.

- Sensor CMOS On-Semi Python 1300 incluido en una cámara Genie Nano 1280M:

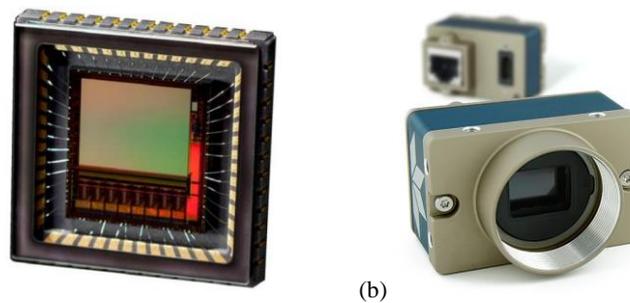


Figura 32: (a) CMOS On Semi Python 1300; (b) Cámara Genie Nano 1280M.

- Óptica electrónica con mount C acoplada a una óptica de  $f=25$  mm:



Figura 33: (a) Óptica  $f=25$  mm KOWA LM8JC1MS; (b) Lente electrónica Optotune EI-16-40 TC.

- Prisma acrílico triangular equilátero con unas dimensiones de  $25 \times 25 \times 22$  mm:



Figura 34: Prisma triangular equilátero.

La eficiencia cuántica del sensor CMOS es máxima para una longitud de onda de 532 nm (color verde) como se mostraba anteriormente en la Figura 8; sin embargo, se probó en un ensayo el uso de un láser He-Ne a 633 nm (rojo) mucho más colimado que el de tipo diodo mostrado anteriormente en la Figura 31, con el objetivo de averiguar si la divergencia y el diámetro inicial del haz láser influirían en la detección del ángulo crítico.

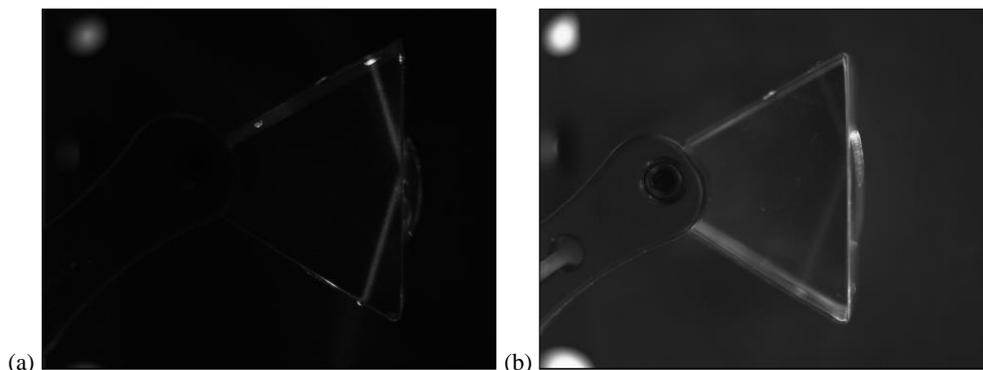


Figura 35: Ejemplo de TIR en laboratorio: (a) Láser rojo; (b) láser verde.

Comparándose la Figura 35(a) y la Figura 35(b), se decidió emplear el láser rojo He-Ne para la caracterización cromatográfica de sustancias, ya que al estar más colimado que el láser verde, el procesamiento de imagen para la determinación del ángulo crítico resulta más sencillo de realizar que con el de tipo diodo, a pesar de tener una eficiencia cuántica un 7% menor.

### Índice de refracción del prisma

El primer paso del experimento consistió en el cálculo del índice de refracción del prisma para la calibración del *setup*. Para ello, se posicionó el láser He-Ne a un ángulo de  $90^\circ$  al vector normal de la mesa óptica, de tal manera que incidiera en el prisma como se muestra en la Figura 36, adquiriendo un fotograma con el láser apagado y otro fotograma con el láser encendido.

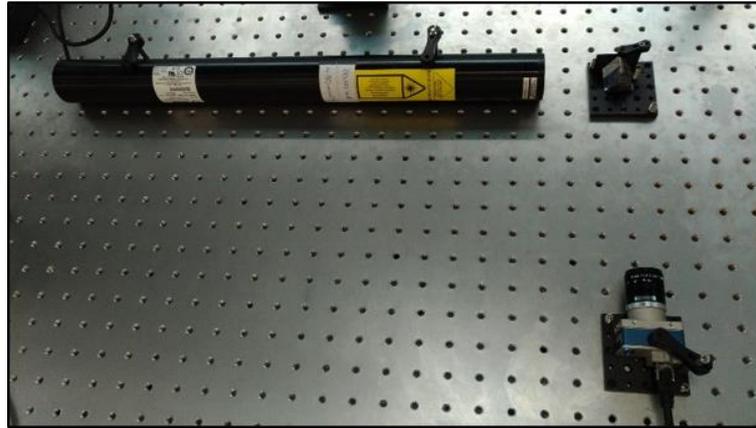


Figura 36: Setup para identificación del índice de refracción del prisma.

El láser He-Ne incide en el prisma triangular equilátero y conociendo los parámetros correspondientes al valor de los ángulos del prisma y al ángulo de incidencia, se aplicó la ley de Snell para obtener el índice de refracción:

$$n_2 = n_1 \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \quad (5.10)$$

Para poder obtener el índice de refracción es necesario conocer el valor del ángulo del rayo refractado en el interior del prisma con respecto a la normal. Para ello, se hizo uso de técnicas de procesamiento digital en los fotogramas adquiridos para calcular dicho valor (véase subsección 5.3.3).

En la Figura 37 se muestra el diagrama de rayos obtenidos al incidir con un haz láser sobre el prisma triangular equilátero.

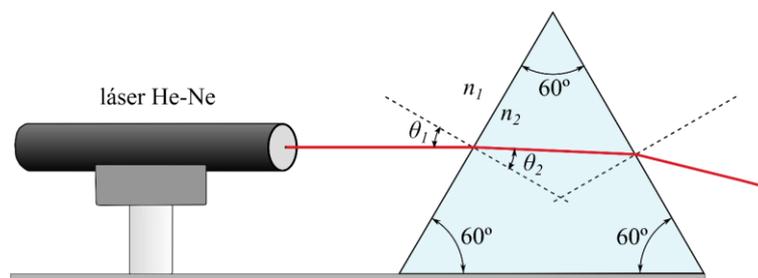
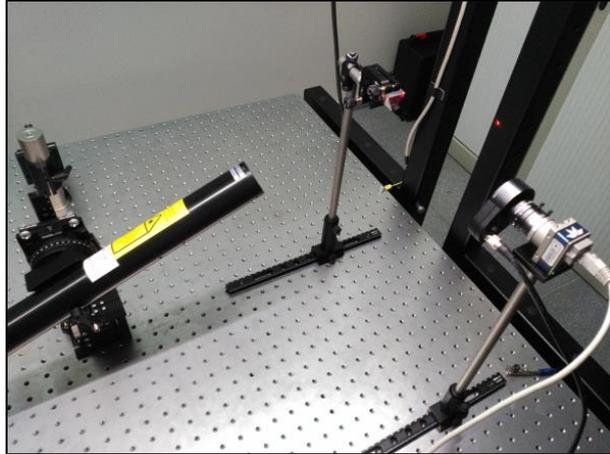


Figura 37: Diagrama de rayos para el cálculo del índice de refracción del prisma.

### Procedimiento experimental del cálculo del ángulo crítico

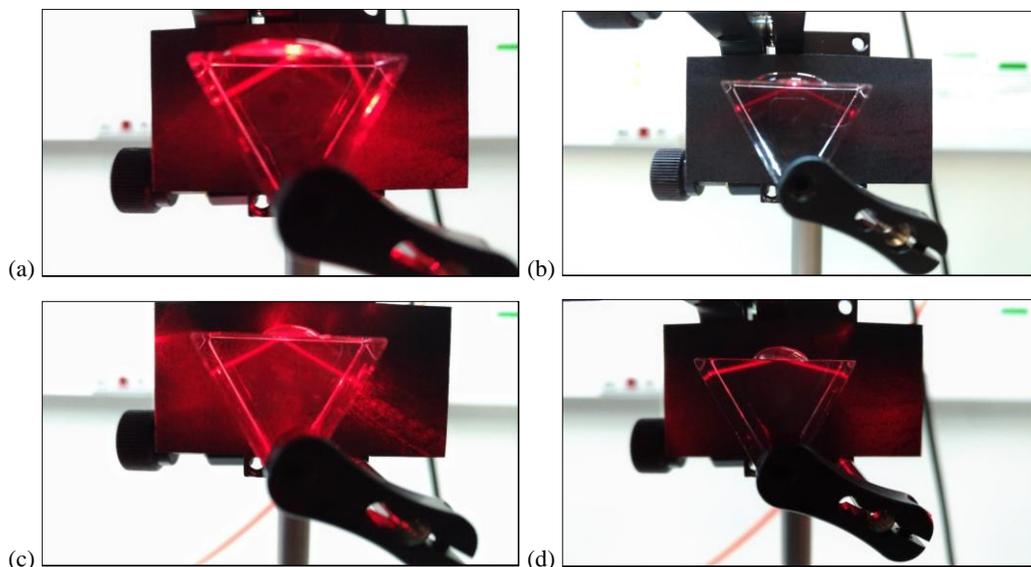
Para calcular el índice de refracción de las muestras escogidas es necesario conocer el  $\theta_c$  producido entre el medio 1 (prisma acrílico) y el medio 2 (muestra). Para ello se desarrolla el montaje que se muestra en la Figura 38 con el objetivo de capturar el momento en el que se produce el fenómeno TIR.



**Figura 38: Setup para identificación cromatográfica de sustancias.**

El procedimiento de uso del setup de la Figura 38 es el siguiente:

- i. Configuración del sensor CMOS y enfoque con la óptica electrónica programado en entorno MATLAB.
- ii. Captura de un fotograma con el láser desconectado.
- iii. Búsqueda manual del ángulo crítico mediante el uso del goniómetro y la plataforma translacional.
- iv. Adquisición de imágenes mientras se realiza la rotación del goniómetro para la búsqueda del instante en el que se produce el fenómeno TIR.
- v. Procesado de las imágenes mediante lenguaje de programación MATLAB para la obtención del ángulo crítico.



**Figura 39: Identificación fenómeno TIR en el prisma equilátero: (a) sin fenómeno TIR con agua; (b) con fenómeno TIR con agua; (c) sin fenómeno TIR con peróxido de hidrógeno; (d) con fenómeno TIR con peróxido de hidrógeno.**

En la Figura 39 se puede observar la búsqueda del fenómeno TIR en el interior del prisma triangular equilátero para dos sustancias distintas, para agua y para peróxido de hidrógeno, con el láser He-Ne. En la subsección 5.3.3 se determina el valor necesario de ángulo de incidencia para que se produzca el fenómeno TIR en cada una de las sustancias.

### 5.3.2 Desarrollo de algoritmos para el cálculo del índice de refracción

En esta subsección se resumen los algoritmos desarrollados para la identificación de partículas mediante la determinación del ángulo crítico de un haz láser. El desarrollo de los algoritmos para la identificación cromatográfica de las sustancias se ha implementado mediante MATLAB 2016b y siguen el esquema que se muestra en la Figura 40.

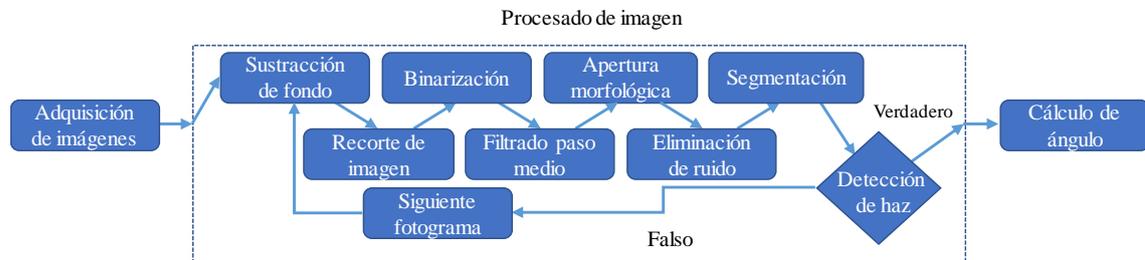


Figura 40: Diagrama de los algoritmos para la identificación química de sustancias.

El procedimiento propuesto se basa en la captura de un fotograma con el láser apagado en el cuál se realiza el proceso de búsqueda de la posición del prisma en la imagen. A continuación, se adquieren distintos fotogramas para la búsqueda del ángulo crítico a los que se les aplica las siguientes operaciones de procesado:

- Sustracción del fondo mediante la resta de una imagen de referencia.
- Recorte del interior del prisma en la localización del haz láser.
- Binarización con un método adaptativo.
- Filtrado paso medio.
- Apertura morfológica con un elemento estructurante en forma de disco.
- Eliminación de ruido mediante el filtrado de objetos menores a un área inferior al área del haz láser.
- Segmentación de los objetos de la imagen.

### Localización del prisma

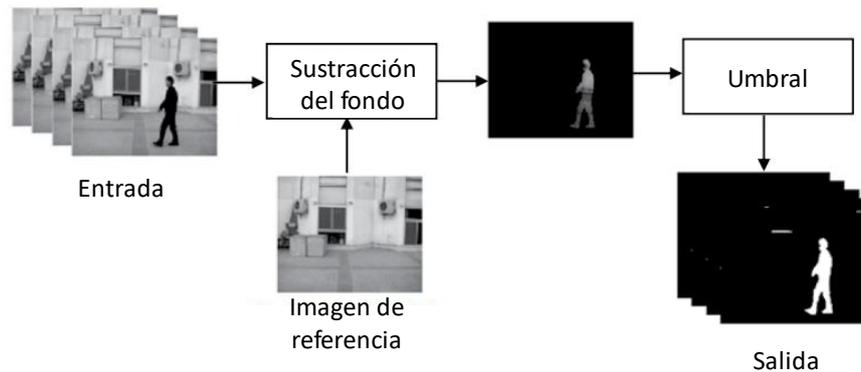
Para poder realizar una correcta detección del haz láser, el primer paso a seguir es la localización precisa del prisma en los distintos fotogramas. Como se trata de un ítem estático, se obtiene su posición en uno de los fotogramas y no varía para el resto. Para una mayor simplicidad del método, su posición se estima en el fotograma con el láser apagado.

Para detectar el prisma se realiza una apertura con un elemento morfológico estructurante con forma de línea con la misma inclinación que uno de los lados del prisma (ya que se conoce la inclinación de cada uno de los lados del prisma al tratarse de un prisma equilátero y su tamaño de 500 píxeles). De esta forma únicamente se detecta el lado del prisma, eliminando posibles objetos detectados con la misma inclinación debido al ruido. Previamente, se debe realizar una binarización adaptativa para poder aplicar la operación morfológica deseada. Una vez detectado, se realiza una segmentación y se obtiene el vértice del prisma utilizando *PixelList*.

### Sustracción del fondo

La sustracción del fondo o detección del primer plano es una técnica común usada para detección de movimiento en escenarios estáticos [63]. Su propósito es el de detectar regiones mediante la sustracción al fotograma actual pixel a pixel de una imagen de referencia. Los píxeles dónde la diferencia es mayor a un umbral se clasifican como primer plano. Su diagrama de

bloques se puede observar en la Figura 41. Tras la creación de un mapa de píxeles de primer plano, se puede hacer uso de operaciones morfológicas de post-procesado para reducir los efectos del ruido y realzar las regiones detectadas.



**Figura 41: Diagrama de bloques para la sustracción del fondo [63].**

El algoritmo es muy sensible a los cambios de luz y a los movimientos de la cámara, por lo que, para la correcta aplicación del algoritmo, es importante que no pase mucho tiempo entre la generación de la imagen de referencia y el fotograma a tratar. En este caso, se toma un fotograma antes de encender el láser y se define como imagen de referencia; para, inmediatamente, adquirir los fotogramas con el láser encendido y detectar el haz láser y clasificarlo como primer plano.

En el diagrama de la Figura 41 se puede observar un ejemplo de una imagen que, tras la generación de la imagen de referencia mediante el promediado de imágenes en un tiempo dado, se detecta el primer plano mediante la sustracción de la imagen de referencia a la original.

### **Recorte de la imagen**

Una vez realizada la sustracción del fondo, como el haz láser ilumina regiones carentes de interés se genera un ruido indeseado que es detectado como primer plano. Para eliminar dicho ruido, se realiza un recorte rectangular de la imagen en la zona interior del prisma dónde incide el haz láser y se refleja especificando las coordenadas y el tamaño de la sección a recortar. Esto es posible al conocer las coordenadas del prisma localizadas en el paso anterior.

### **Binarización adaptativa**

El proceso de binarización de una imagen está basado en la comparación de los niveles de gris que se hallan presentes en la imagen con un valor umbral [64]. Por lo que una forma simple de binarizar es separar en regiones oscuras o claras dependiendo de la intensidad de los píxeles mediante el umbral, asignando un valor de cero o uno según el tipo de región [65].

En MATLAB, la función *im2bw* que realiza el proceso de binarización con un umbral de 0.5 por defecto, aunque se puede cambiar dicho valor.

La binarización es uno de los puntos más críticos para poder segmentar los objetos, ya que de no hacerse de forma adecuada los haces láser de la imagen capturada no se visualizarán correctamente. Por este motivo, la selección del valor umbral es muy importante para obtener una binarización óptima de la imagen.

Para realizar la binarización utilizamos la función MATLAB *imbinarize* [66] que por defecto usa un método de binarización global llamado Otsu. El método Otsu utiliza el histograma de valores en escala de grises [67] para encontrar el umbral óptimo mediante el cálculo de medias y desviaciones típicas en los niveles de la imagen para adecuar la binarización de la imagen.

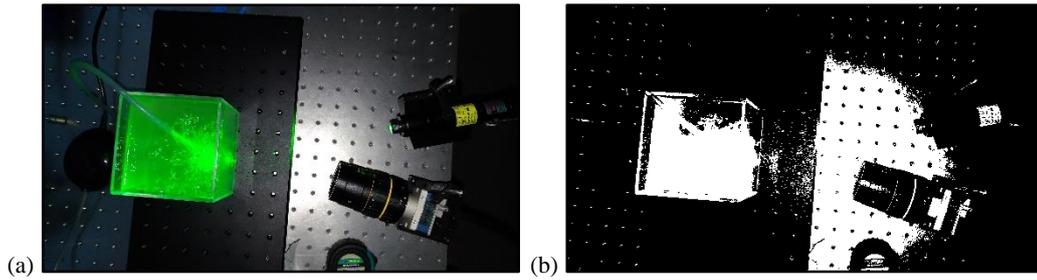


Figura 42: Ejemplo función *imbinarize* (Otsu): (a) Imagen en color; (b) Imagen binarizada.

Además, también existen los métodos de umbralización local [65], en los que se usa más de un valor umbral, siendo éste calculado para diferentes regiones dependiendo de las propiedades de la imagen. MATLAB posee la función *imbinarize* [68], de umbralización adaptativa que se aplica localmente en regiones de la imagen calculando el umbral en función de la intensidad media alrededor de los píxeles vecinos. En la Figura 43 se muestra un ejemplo de binarización local adaptativa.

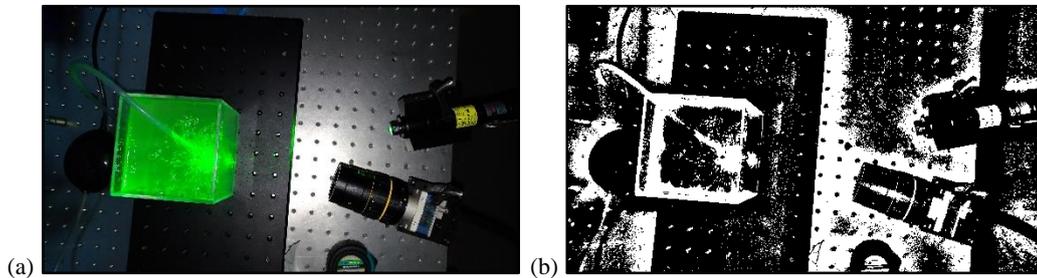


Figura 43: Binarización local: (a) Imagen en color; (b) Imagen binarizada.

Tras la adquisición de imágenes será necesario adaptar la umbralización con el fin de que el haz se detecte lo mejor posible, sin aumentar excesivamente el tiempo de computación.

### Filtrado paso medio

El filtrado paso medio es una técnica de filtrado digital no lineal que selecciona el valor medio de los píxeles vecinos [43]. Su propósito es la eliminación de ruido, como el ruido shot. Se usa como técnica de pre-procesado para mejorar una detección posterior. El suavizado no lineal, en concreto, es muy útil para la preservación de bordes. El uso del filtro no suaviza los ejes mientras elimina ruido de altas frecuencias.

Para ello, se emplea un filtro paso medio llamado *medfilt2* en MATLAB [69], el cual consiste en una operación no-lineal que suele emplearse para la eliminación del ruido en una imagen al mismo tiempo que se mantienen los bordes de los ítems de la imagen. Se muestra un ejemplo de aplicación en la Figura 44.

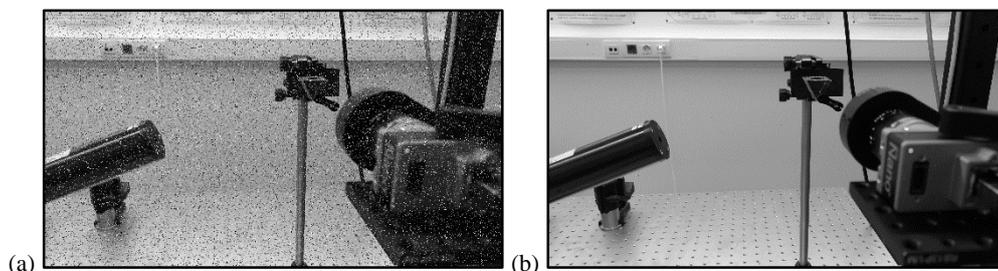


Figura 44: Ejemplo filtro paso-medio: (a) Imagen con ruido; (b) Imagen con ruido limpiado.

### Apertura morfológica

La apertura de una imagen consiste en el aumento de las áreas negras de una imagen mediante la combinación de una erosión y una dilatación [70]. El objetivo de un filtro de erosión consiste en la eliminación del ruido que aparece en una imagen binarizada, que bien podrá verse como puntos o pequeños bloques de píxeles blancos. La erosión elimina zonas blancas con tamaños inferiores al elemento estructurante usado [43]. En MATLAB existe una función que realiza dicho filtrado llamado *imerode* [71] a partir de una imagen binarizada y un elemento estructurante llamado *strel*.

El objeto *strel* [72] representa un elemento estructurante morfológico con distintas formas (diamante, disco, línea, cuadrado, rectángulo, octágono, cubo o esfera) de un tamaño variable que resulta esencial en operaciones de erosión y dilatación.

Tanto el tamaño como el tipo de *strel* serán los óptimos para eliminar el ruido sin afectar a los píxeles blancos de los haces a detectar. En la Figura 45 se muestra un ejemplo de la función *imerode* con un elemento *strel* lineal de tamaño 3 con una inclinación de 90°.

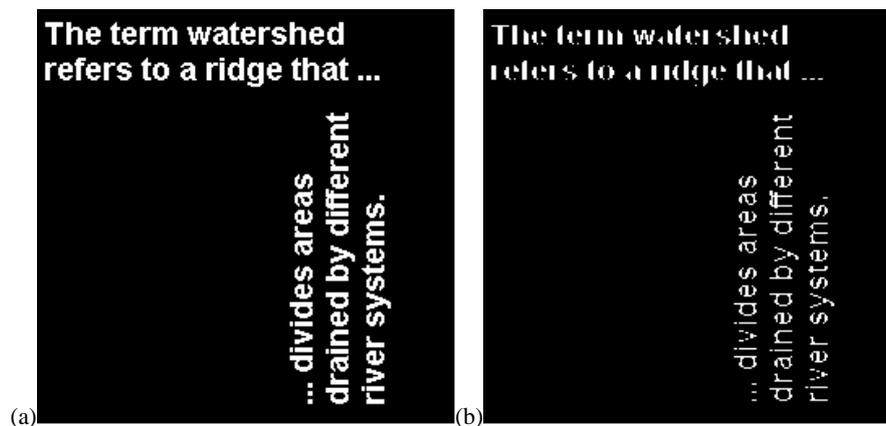


Figura 45: Ejemplo de filtrado con la función *imerode*: (a) imagen original [71]; (b) imagen erosionada.

La dilatación y la erosión son conceptualmente similares. Mediante la dilatación de una imagen cualquier pixel negro que se encuentre en contacto con un pixel blanco se vuelve blanco. Esto tiene el efecto de agrandar los objetos y fusionarlos con los adyacentes como se observa en la Figura 46.

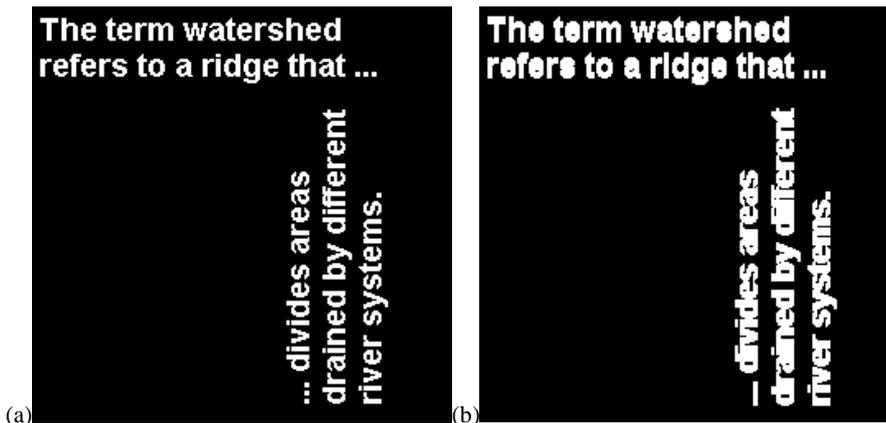


Figura 46: Ejemplo de dilatación con la función *imdilate*: (a) imagen original [71]; (b) imagen dilatada.

El proceso de apertura se basa en el uso de un filtro de erosión que producirá una pérdida de píxeles blancos, para posteriormente realizar un filtro de dilatación (aumento de píxeles blancos) para volver a aumentar los píxeles blancos que se han eliminado con anterioridad. No es necesario tener en cuenta el ruido eliminado con anterioridad ya que éste no volverá a aparecer en la imagen, si se ha eliminado completamente en el paso anterior. En la Figura 47 se muestra el ejemplo de una apertura morfológica con un elemento estructurante en forma de disco.

La aplicación de realizar la apertura morfológica de una imagen se puede implementar en MATLAB mediante la llamada a la función *imopen* [73], que aplica directamente una erosión y una dilatación el mismo elemento estructurante.

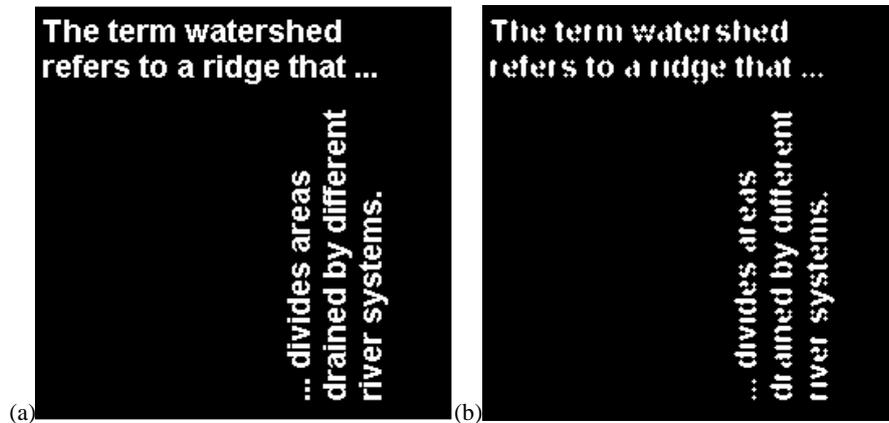


Figura 47: Ejemplo función *imopen*: (a) imagen original [71]; (b) imagen con apertura morfológica.

### Eliminación de ruido

A pesar del procesado efectuado sobre la imagen, la imagen no se acaba de librar de todo el ruido. Como los haces láser tienen un área grande en comparación con el ruido es posible el uso de técnicas de filtrado de objetos pequeños. Para ello, MATLAB podemos utilizar la función *bwareaopen* cuyo fin es el eliminar pequeños ítems que parezcan en una imagen [74]. Para utilizar esta función, se utiliza una imagen binarizada y se especifica el número de píxeles de los objetos conectados que se deseen eliminar. En la Figura 48 se puede observar el ejemplo de la aplicación de la función *bwareaopen*, donde los objetos con un tamaño inferior al área especificada desaparecen, en este caso 50 píxeles.



Figura 48: Ejemplo de filtrado *bwareaopen*: (a) Imagen original binarizada [71]; (b) Imagen binarizada con filtrado de objetos definido para 50 píxeles.

### Segmentación

La segmentación de imágenes es la técnica de encontrar grupos de píxeles que “vayan juntos” [43]. En estadística, este problema se conoce como análisis de clústeres y es usado en infinidad de algoritmos.

En visión artificial, la segmentación de una imagen es uno de los problemas más antiguos y estudiados. Las primeras técnicas de segmentación se basaban en divisiones y fusiones de regiones. Las técnicas más recientes se basan en la optimización de criterios globales como la consistencia de tamaño de bordes de intraregiones e interregiones o disimilitud.

Para la segmentación, se ha hecho uso de funciones de MATLAB para identificar objetos mediante etiquetas como *bwlabel* [75] y para extraer las propiedades de los objetos identificados como *regionprops* [76].

Para el cálculo del índice de refracción es necesario la obtención del ángulo comprendido entre el haz láser incidente y el reflejado en el momento que se está produciendo el fenómeno TIR, por ello es importante la segmentación de los dos haces láser por separado (el incidente y el reflejado) para estimar su orientación y con ello el ángulo entre ambos. La segmentación se facilita ya que debido al efecto Goos-Hänchen existe una mayor separación entre los dos haces en la intersección de los medios, lo que permite una correcta segmentación.

En la Figura 49 se puede observar el ejemplo de un proceso de segmentación en el que a cada objeto detectado se le ha asignado un color distinto en la escala de grises.

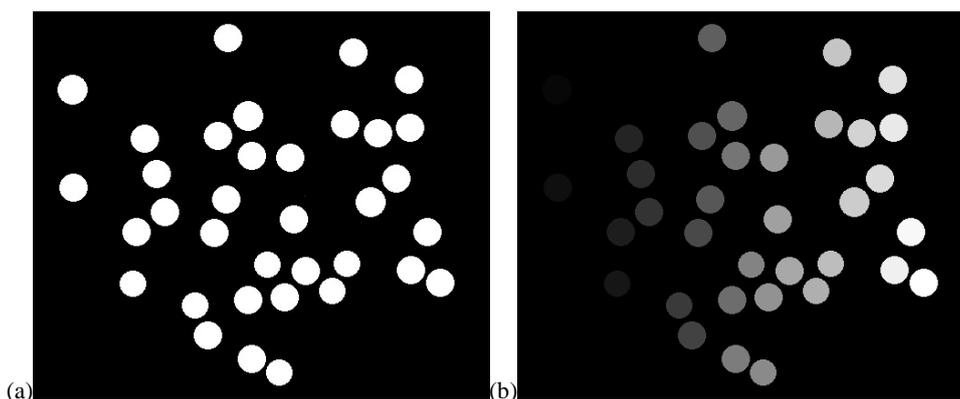


Figura 49: Segmentación: (a) Imagen original; (b) imagen segmentada en objetos.

### 5.3.3 Resultados experimentales

Para la adquisición de imágenes en este trabajo, tal como se comentó anteriormente, se utilizó la cámara Genie Nano M1280 con conexión vía Ethernet. Esto permite controlar con MATLAB la adquisición de imágenes y configurar los parámetros de la captura como el tiempo de exposición y la ganancia, como se explicó en la sección 4.3. Para que los resultados sean óptimos, es necesaria la modificación de dichos parámetros como se resume en la Tabla 8. Ya que el prisma es un ítem estático, se incrementa el tiempo de exposición para facilitar la adquisición de imágenes en entornos con baja intensidad lumínica. Además, como el movimiento del goniómetro es manual, para encontrar con mayor facilidad el momento en el que se produce el fenómeno TIR, la velocidad de grabación se establece en 80 fps, haciendo necesaria la disminución del área de la región de interés a 1152×921 píxeles, para asegurar la capacidad de transmisión en el ancho de banda vía ethernet.

Tabla 8: Parámetros entrada sensor para la adquisición de imágenes.

Parámetros de adquisición de imágenes	
Velocidad	80 fps
Ganancia	5
Tiempo de exposición	15000 $\mu$ s
Región de interés	1152×921 píxeles

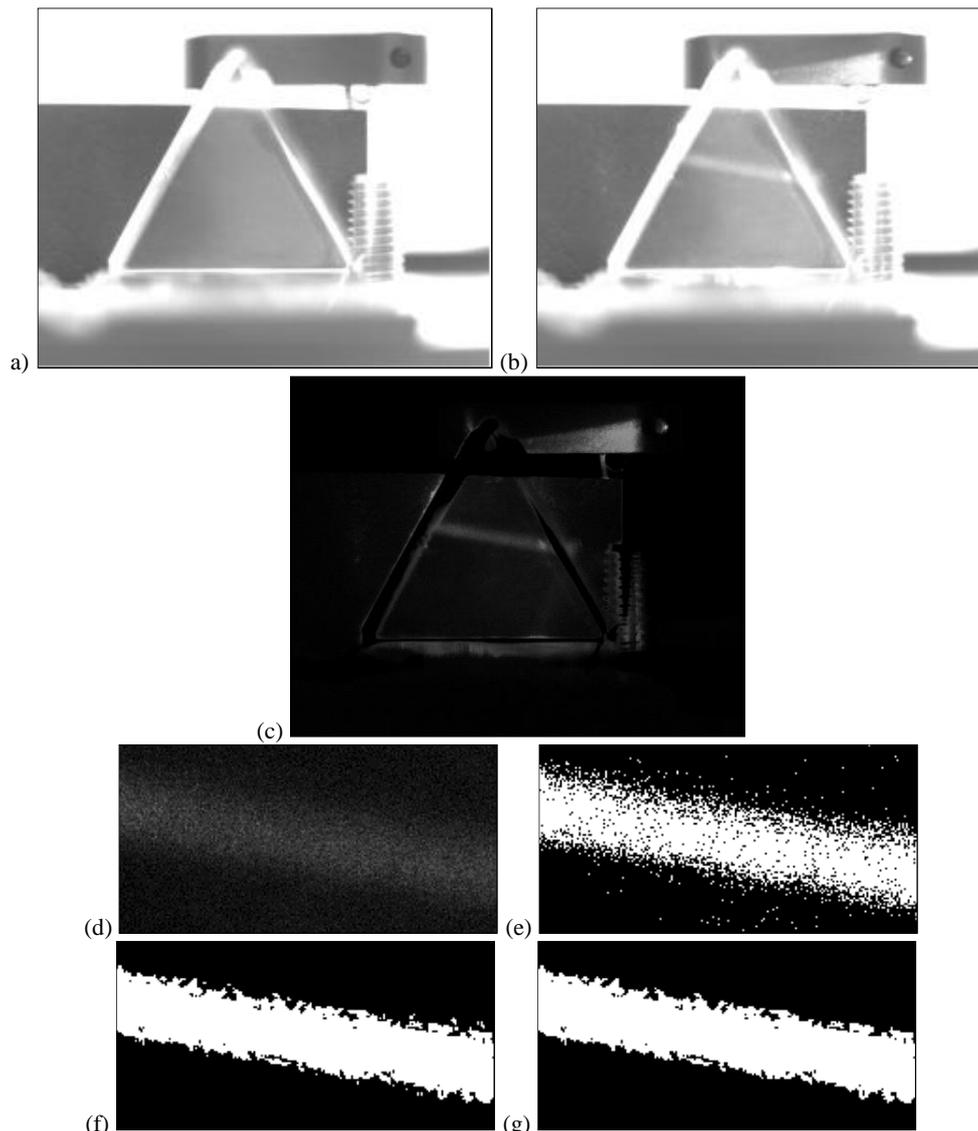
En primer lugar, se procede a la obtención del índice de refracción del prisma para poder realizar las medidas de determinación del índice de refracción de las distintas sustancias escogidas. El índice de refracción del prisma se obtuvo mediante el uso de los siguientes tratamientos:

- i. Captura de la imagen de referencia del prisma con el láser apagado.
- ii. Captura de la imagen cuando el láser está incidiendo en el prisma.

## Técnica B: identificación de partículas mediante determinación del ángulo crítico

- iii. Sustracción de la imagen de referencia.
- iv. Recorte del haz láser en la imagen.
- v. Binarización mediante método Otsu.
- vi. Filtro paso medio.
- vii. Eliminación del ruido de fondo.

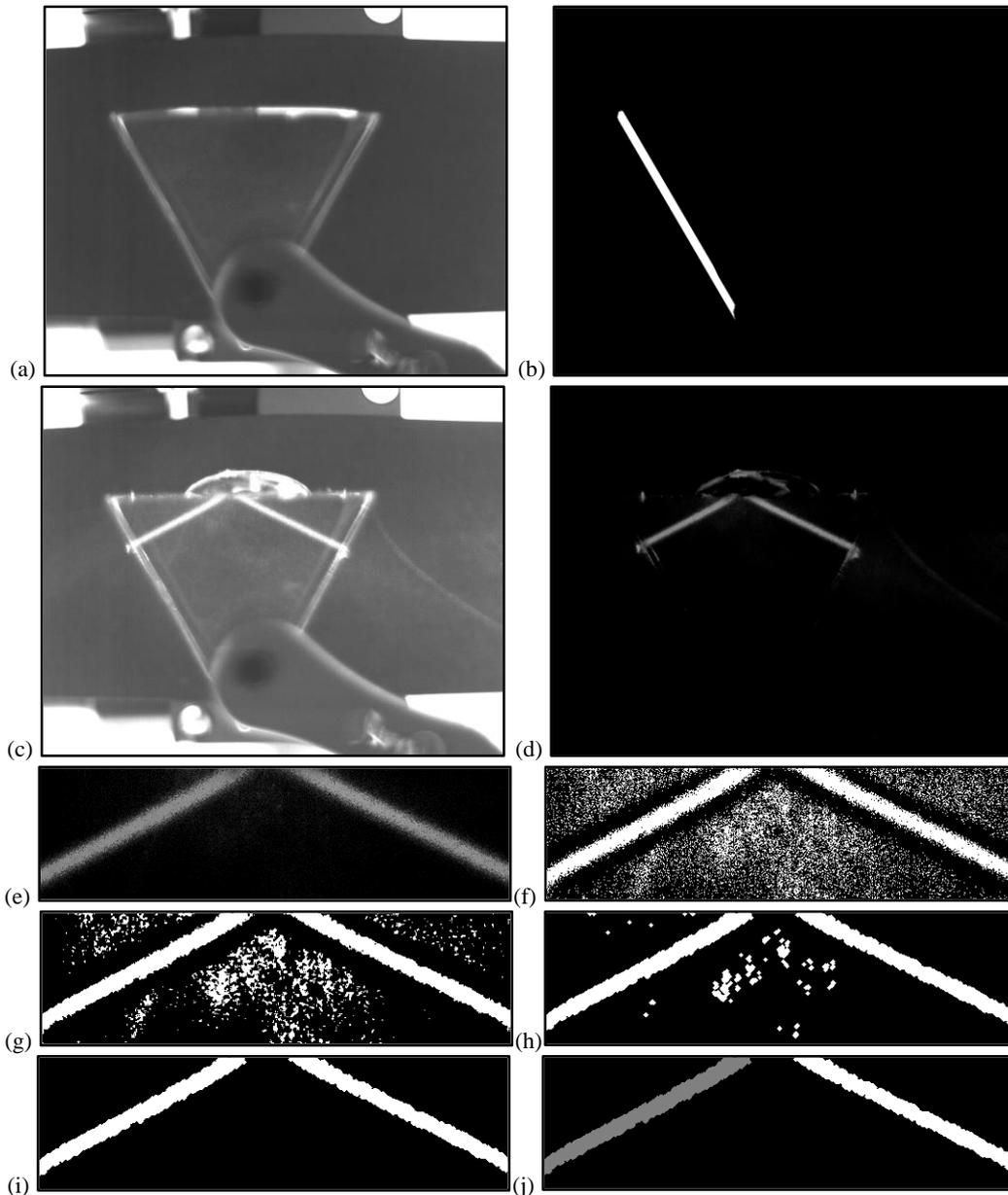
En primer lugar, se procede a la obtención del índice de refracción del prisma para poder realizar posteriormente la caracterización del índice de refracción de las distintas sustancias que se posen sobre el prisma. El índice de refracción del prisma se obtuvo mediante el uso de los siguientes tratamientos, cuyos resultados se pueden observar en la Figura 50:



**Figura 50: Tratamiento digital de imagen con fenómeno TIR: (a) Imagen original;(b) localización del prisma ;(c) imagen fondo;(d) sustracción del fondo;(e) recorte de la zona del prisma;(f) binarización adaptativa;(g) filtrado medio;(h) Apertura de la imagen;(i) filtrado de objetos pequeños;(j) segmentación de los objetos.**

A partir del haz láser se procede al cálculo de su ángulo con respecto a la normal, obteniendo un valor de  $19.5159^\circ$ ; lo que corresponde, empleando la ley de Snell, con un valor, para el prisma, del índice de refracción de 1.4970.

Una vez conocido el índice de refracción del prisma, se procedió al cálculo del índice de refracción de las sustancias que entran en contacto con la superficie. La determinación del ángulo crítico del haz láser se realizó experimentalmente para diferentes sustancias: agua ( $H_2O$ ), fluido óptico LS-5246, 2-propanol ( $CH_3CHOHCH_3$ ), etanol ( $CH_3CH_2OH$ ), peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ), etanol 96%, aceite de oliva, aceite de maíz, aceite de uva, vino tinto y leche.



**Figura 51: Tratamiento digital de imágenes para el cálculo del índice de refracción: (a) Imagen de referencia; (b) localización del prisma; (c) Imagen original; (d) sustracción del fondo; (e) recorte del haz láser en la imagen; (f) binarización mediante método Otsu; (g) filtrado paso medio; (h) apertura de la imagen; (i) filtrado de objetos pequeños; (j) segmentación de los objetos.**

Los tratamientos que se realizaron para la identificación del ángulo crítico son los enunciados en la subsección 5.3.2, obteniendo los resultados que se pueden observar en la Figura 51 para el caso de que se produzca el fenómeno de la reflexión total interna.

Cuando no se produzca TIR, el procedimiento es análogo, con la diferencia de que en el resultado de la segmentación final no aparecen dos haces, sino que se detecta un tercer haz debido a que el transmitido al medio correspondiente a la sustancia a caracterizar se guía de nuevo al prisma como se puede observar en la Figura 52. En este caso también se ha observado experimentalmente que el ruido en el interior del prisma aumenta significativamente.

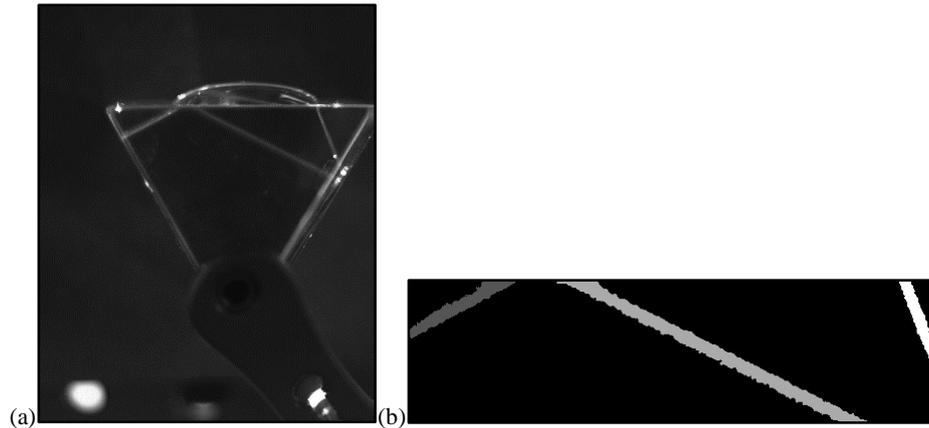


Figura 52: Tratamiento digital de imagen sin fenómeno TIR: (a) Imagen experimental original; (b) procesado de segmentación de los objetos.

A partir de los resultados obtenidos con los algoritmos de procesamiento propuestos para la determinación del ángulo crítico del haz láser, se procede al cálculo del índice de refracción de las sustancias en cuestión. Para ello, se repitió el procedimiento de medida cuatro veces para cada sustancia. En la Figura 53 se puede observar el resultado de un ensayo para dos sustancias, obteniendo un ángulo crítico para el 2-propanol de  $\theta_{c,2-propanol} = 64.4335^\circ$  y para el peróxido de hidrógeno de  $\theta_{c,peróxido\ de\ hidrógeno} = 69.3342^\circ$ .

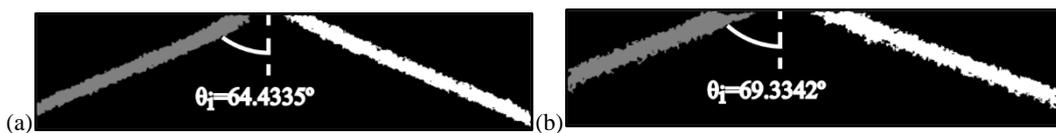


Figura 53: Ángulo detectado mediante la aplicación de los tratamientos digital de imagen para: (a) 2-propanol; (b) peróxido de hidrógeno.

En la Tabla 9 se reportan los resultados del cálculo del índice de refracción obtenidos para cada una de las sustancias bajo estudio, siendo el índice de refracción representado en la tabla el valor medio de los resultados de cada una de las cuatro pruebas experimentales. En la tabla también se incluye la desviación típica y el error relativo calculados, teniendo en cuenta que, para ciertas sustancias como el aceite, el índice de refracción varía según la densidad del producto. En el caso de la leche, el índice de refracción varía según la concentración de grasa [77], por lo que el error que se obtiene es debido a una mayor concentración en la muestra analizada. Para las sustancias en las que el valor del índice de refracción varía según un rango como se muestra en el Anexo A, se ha calculado su error en base a la media de dicho rango. Siendo el etanol 96% la sustancia con mayor error, con un error de 0.91% y el aceite de oliva el menor error, siendo este de 0.16%.

Se puede observar que se produce un error constante en los resultados obtenidos. Esto puede deberse a que el índice de refracción calculado para el prisma no sea correcto. Como se ha comentado anteriormente, para el cálculo del índice de refracción del prisma se ha asumido que el prisma es totalmente equilátero y que todos los ángulos del prisma son de  $60^\circ$ . No obstante, normalmente en la fabricación de prismas se tiene una tolerancia angular, que se refiere al error producido en la fabricación con respecto al ángulo del prisma. Esto puede proporcionar un error relativamente alto para la medida del índice de refracción.

**Tabla 9: Resultados índices de refracción de las distintas sustancias con un prisma con índice de refracción de 1.4970 <sup>1</sup>.**

Sustancia	Índice de refracción medido	Error relativo (%)	Desviación estándar
Agua	1.3274	0.32	0.0003
Fluido Óptico	1.4531	0.32	0.0010
2-propanol	1.3726	0.27	0.0014
Etanol	1.3564	0.25	0.0011
Aceite de oliva	1.4627	0.16	0.0009
Aceite de maíz	1.4716	0.23	0.0009
Aceite de uva	1.4741	0.13	0.0464
Peróxido de hidrógeno	1.4005	0.44	0.0012
Etanol 96% <sup>2</sup>	1.3474	0.91	0.0006
Vino tinto	1.3469	0.59	0.0014
Leche	1.3482	0.70	0.0012

Por lo que se realizaron las mismas medidas suponiendo que el índice de refracción del prisma es de  $n_{prisma} = 1.5015$ , siendo este el valor de índice de refracción que minimiza el error. En la Tabla 10 se muestran los resultados obtenidos considerando el nuevo índice de refracción del prisma y se puede observar cómo se reduce el error significativamente, a un máximo error de 0.61% para el etanol 96% y el menor error con solo un 0.02% para el agua y el fluido óptico.

**Tabla 10: Resultados índices de refracción de las distintas sustancias con un prisma con índice de refracción de 1.5015.**

Sustancia	Índice de refracción medido	Error relativo (%)	Desviación estándar
Agua	1.3314	0.02	0.0003
Fluido Óptico	1.4574	0.02	0.0010
2-propanol	1.3767	0.03	0.0014
Etanol	1.3604	0.05	0.0011
Aceite de oliva	1.4671	0.14	0.0009
Aceite de maíz	1.4761	0.07	0.0009
Aceite de uva	1.4785	0.17	0.0463
Peróxido de hidrógeno	1.4047	0.14	0.0012
Etanol 96%	1.3514	0.61	0.0007
Vino tinto	1.3509	0.30	0.0014
Leche	1.3523	0.40	0.0012

<sup>1</sup> La temperatura en el laboratorio fue de 25°C.

<sup>2</sup> El error se ha medido en base al índice de refracción del etanol, debido a la falta de bibliografía para la longitud de onda usada y la similitud de sus valores [73].

## 5.4 Estudio de integración del sensor

Para la integración del sensor, se lleva a cabo un estudio para reducir al máximo el tamaño del prisma y la sensibilidad de variación del ángulo para la incorporación en dispositivos.

### 5.4.1 Colimación del haz láser y sensibilidad de variación del ángulo

Se llevaron a cabo simulaciones con el software de simulación COMSOL Multiphysics para reducir el tamaño del prisma. El tamaño del prisma depende del tamaño del spot que se produce cuando se ocasiona la reflexión total interna. Para ello, primero, se simuló un láser a una longitud de onda de  $\lambda = 633 \text{ nm}$  con un diámetro de haz de  $0.48 \text{ mm}$  y una divergencia de  $\Phi = 1.7 \text{ mrad}$  y se incluyeron dos lentes convergentes, para reproducir un reductor de haz basado en el esquema Kepler, de distancia focal  $f = 100 \text{ mm}$  y  $f = 10 \text{ mm}$ . Un reductor de haz, como se puede observar en la Figura 54, basado en el esquema de Kepler consiste en dos lentes convexas con la distancia focal de las dos lentes centrada en el mismo punto en el espacio, cuya reducción de haz depende del factor de las distancias focales de las dos lentes [78].

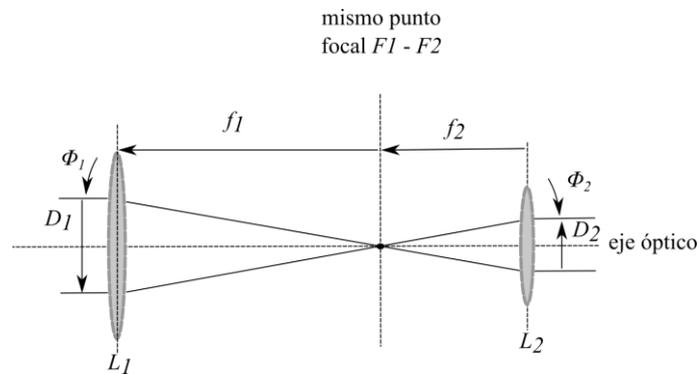


Figura 54: Reductor de haz esquema Kepler.

Con los componentes anteriores se calculó el diámetro del haz a la salida del sistema de lentes y la divergencia del haz láser como se puede observar en la Figura 55(a), obteniendo un resultado de diámetro de haz de  $45 \mu\text{m}$  y una divergencia de  $\Phi = 17 \text{ mrad}$  a la salida.

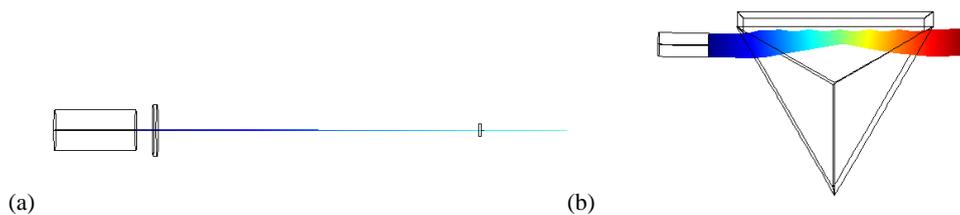
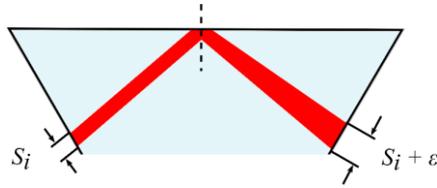


Figura 55: (a) Haz láser reducido mediante un sistema de lentes; (b) Reflexión total interna en microprisma para índice de refracción de la sustancia de  $n_{muestra} = 1.4741$ .

A partir de dicho valor de diámetro de haz láser y divergencia, se simuló el haz para obtener el valor del tamaño de spot que se produce al reflejarse en la muestra cuando se ocasiona el fenómeno TIR, para ello se generó una superficie rectangular en la superficie del prisma con el índice de refracción de la muestra como se puede observar en la Figura 55(b). Para una sustancia con un índice de refracción de  $n_{muestra} = 1.4741$ , que se trata del valor máximo de índice de refracción de las muestras bajo estudio, se obtiene un valor de tamaño de spot de  $290.8 \mu\text{m}$ , por lo que el tamaño del prisma se puede reducir a unas dimensiones de  $290.8 \times 290.8 \times 45 \mu\text{m}$ .

Además, también se estudió el tamaño a partir del cual la divergencia afectaba en la digitalización del haz laser y el error que producía, para ello se simuló un haz láser sin divergencia en MATLAB y se estimó la orientación. A continuación, se le añadió un pixel al haz láser a la anchura a partir

de la mitad del haz láser, para simular divergencia y se obtuvo de nuevo la orientación. Se comprobó que el error relativo producido por la divergencia del haz láser al calcular la orientación equivale a 0.018%.



**Figura 56: Diagrama de la divergencia del haz láser en el interior del prisma.**

También se procedió al cálculo de la distancia necesaria para que la divergencia afecte a las medidas. Para ello, se calculó al tamaño real al que equivale cada pixel, obteniendo un valor de 0.04 mm. Por lo que para que no se produzca error en la medida, es importante que el tamaño inicial ( $S_i$ ) que representa la cantidad de píxeles necesarios para digitalizar la anchura del haz, cómo se puede observar en la Figura 56, no se vea aumentado por un valor  $\epsilon$  de un pixel. Sabiendo que la divergencia hace referencia al incremento del diámetro del haz en función de la distancia desde la fuente óptica [79]. Podemos obtener la divergencia ( $\Phi$ ), sabiendo el diámetro del haz en dos puntos separados ( $D_i$  y  $D_f$ ) y la distancia entre ellos ( $l$ ) como:

$$\Phi = \frac{D_f - D_i}{l} \quad (5.11)$$

Aplicando la ecuación 5.11, se obtiene que, para obtener un incremento de un pixel en el diámetro del haz láser, equivalente a 0.04 mm, la distancia que tiene que recorrer el haz láser dentro del prisma es de 33.33 mm. En este caso, el prisma tiene unas dimensiones de 25×25×22 mm y está diseñado para medir los índices de refracción de un rango de 1.3317 a 1.4741. Para un índice de refracción de  $n_{muestra} = 1.3317$ , el haz láser viaja una distancia de 21.70 mm dentro del prisma, lo que equivale a un aumento del haz láser del diámetro inicial al diámetro final de 0.65 píxeles. Para un índice de refracción de  $n_{muestra} = 1.4741$ , el haz láser viaja una distancia de 23.04 mm, resultando en un incremento de 0.69 píxeles. Por lo que el incremento siempre es inferior a un pixel.

## 5.5 Discusión de resultados obtenidos

En esta sección se exponen los resultados correspondientes al cálculo de los índices de refracción de las distintas sustancias bajo estudio. En primer lugar, se ha calculado experimentalmente el índice de refracción del prisma considerando que todos los ángulos eran de 60° y se ha obtenido un valor de índice de refracción de  $n_{prisma} = 1.4970$ . Con dicho valor de índice de refracción, se ha calculado el índice de refracción de distintas sustancias. El error cometido en las medidas varía desde 0.16% hasta 0.91%, pero se tiene que tener en cuenta que para ciertas sustancias como es el caso de los distintos aceites, el etanol 96%, el vino tinto y la leche los resultados obtenidos se han comparado con la bibliografía para obtener el error, pero es posible que la composición de dichas sustancias difiera de la utilizada en la bibliografía, ya que cada fabricante usa una composición distinta. Por lo que el error, puede diferir del calculado. Este error, también puede deberse en parte a que la geometría del prisma no es ideal, y los ángulos no son 60° exactos. Ajustando el índice de refracción a  $n_{prisma}=1.5015$  el error disminuye considerablemente, por lo que es posible que el índice de refracción de  $n_{prisma} = 1.4970$  no se trate del índice de refracción real del prisma. A pesar de que el error disminuye considerablemente, sigue siendo un error demasiado elevado para poder diferenciar burbujas de aire de cavitación debido a la similitud de sus índices de refracción.

### Capítulo 6. Conclusiones

En este Trabajo Final de Grado se han desarrollados dos sensores fotónicos capaces de detectar y caracterizar partículas en suspensión en flujo multifase agua-aire analizando la morfología y la velocidad de las burbujas como calculado el índice de refracción del compuesto.

En primer lugar, se ha diseñado un sensor que, mediante el uso de un láser con una longitud de onda de 532 nm (dentro del rango de longitudes de onda del espectro visible de color verde) con una lente divergente, un LED con iluminación difusa y una cámara de alta velocidad, es capaz de calcular la velocidad de las partículas en suspensión en el flujo multifase. En esta memoria se resumen los pasos seguidos en el tratamiento digital de imágenes para el cálculo de la velocidad de las burbujas utilizando diferentes técnicas de descriptores locales (SIFT y SURF) y en una técnica de seguimiento de patrones de brillos estructurados en pirámides multi-resolución (Optical Flow). En este trabajo se han analizado y comparado los resultados experimentales obtenidos por cada uno de los métodos. Se ha comprobado que el método del Optical Flow piramidal, en general, es el método que menos error comete, aunque a expensas de un mayor tiempo de computación. El método basado en Optical Flow es el método más costoso computacionalmente de los evaluados en este trabajo, impidiendo el desarrollo de una aplicación que calcule la velocidad de las burbujas en el flujo en tiempo real. El uso de las técnicas basadas en los métodos SIFT y SURF, facilitaría la monitorización casi en tiempo real, especialmente el método SURF, cuyo coste computacional es aproximadamente 49 veces menor. Este sensor encuentra aplicación en medios líquidos y gaseosos como sería el caso de instalaciones de generación eléctrica hidráulica para una gestión más eficiente de los órganos de desagüe mediante una caracterización completa del flujo multifase.

En segundo lugar, se ha desarrollado una tecnología óptica para la identificación de partículas mediante la determinación del ángulo crítico de un haz láser. Se ha utilizado un láser He-Ne que opera a 633 nm (dentro del rango de longitudes de onda del espectro visible de color rojo), un prisma equilátero y una cámara de alta velocidad. La inclinación del haz láser incidente se modifica mediante un goniómetro hasta encontrar el ángulo crítico donde se produce reflexión total interna. El momento del fenómeno TIR se captura mediante un sensor CMOS apuntando al prisma para calcular dicho ángulo. La validación experimental de esta técnica se ha realizado para diferentes sustancias colocando una gota sobre el prisma. Este sensor también puede aplicarse para detectar la presencia de sustancias en flujos multifase, complementando el sensor anterior.

Además, las técnicas propuestas también tienen aplicaciones biomédicas, ya que la detección e identificación de compuestos químicos presentes en el flujo multifase puede ser usado para el estudio de la sangre y su composición celular, para el tratamiento de embolismo aéreo venoso e incluso para cirugías basadas en el uso de cavitación.

#### 6.1 Publicaciones asociadas a los resultados de este trabajo

Como resultado de este trabajo final de grado se han realizado las siguientes publicaciones científicas:

1. Roberto Llorente, Francisco J. Vallés-Morán, Maria Morant, Arnau Bayón, Sergio L. Carrasco-Ortiz, Eduardo Valero, Santiago López y Ana Belén Martín, “Caracterización de flujos emulsionados en estructuras hidráulicas mediante tecnología fotónico”, será presentado el 25 de octubre de 2017 como presentación oral en V Jornadas de Ingeniería del Agua – geama (JIA 2017), paper C-081, A Coruña, Oct. 2017. Véase el Anexo B.
2. Sergio L. Carrasco-Ortiz, Eduardo Valero, Maria Morant y Roberto Llorente, “Photonic sensing and characterization of multiphase flows”, enviado y en proceso de revisión en *6<sup>th</sup> International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology* (PHOTOPTICS 2018), Funchal, January 2018. Véase el Anexo C.
3. Eduardo Valero, Sergio L. Carrasco-Ortiz, Maria Morant y Roberto Llorente, “Refractive index identification of liquid samples by laser critical angle calculation”, enviado y en proceso de revisión en to *6<sup>th</sup> International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology* (PHOTOPTICS 2018), Funchal, January 2018. Véase el Anexo D.

## 6.2 Líneas abiertas y pasos siguientes

Con este Trabajo Final de Grado se han abierto varias líneas de investigación que se podrán seguir en el futuro para la realización de un Trabajo Fin de Máster.

La cavitación es uno de los fenómenos de mayor importancia para la hidrodinámica de las grandes presas, debido a que compromete la estabilidad de la estructura, por lo que una de las líneas consiste en el desarrollo de una tecnología capaz de detectar cavitación y diferenciarla de la aireación, lo que puede contribuir a una operación más segura evitando grandes desastres ocurridos en el pasado.

Otro aspecto interesante a lograr es la caracterización del flujo multifase en tiempo real para la motorización de los órganos de desagüe de manera más efectiva, dando tiempo a actuar ante posibles problemas hidráulicos mediante el uso de técnicas de estimación de movimiento más optimizadas en cuanto a tiempo de computación.

Además, los biosensores basados en el fenómeno de reflexión total interna (TIR) se pueden emplear para la detección de enfermedades, para medir ensayos biomoleculares y para diversas aplicaciones industriales más. Otro objetivo de investigación sería diseñar una versión de este sensor de forma que pudiera integrarse como módulo a utilizar con una cámara convencional como la de un teléfono móvil, de forma que se pudiera conocer el índice de refracción y la composición de la sustancia a analizar de forma fácil y rápida.

También se propone seguir investigando la técnica basada en TIR mediante la inclusión de dos láseres para el cálculo de la velocidad de burbujas mediante la correlación del patrón de potencia óptica recibida. En la Figura 57 se muestra un esquema conceptual del sistema dónde una misma burbuja se detecta por los dos láseres generando el mismo patrón de potencia óptica.

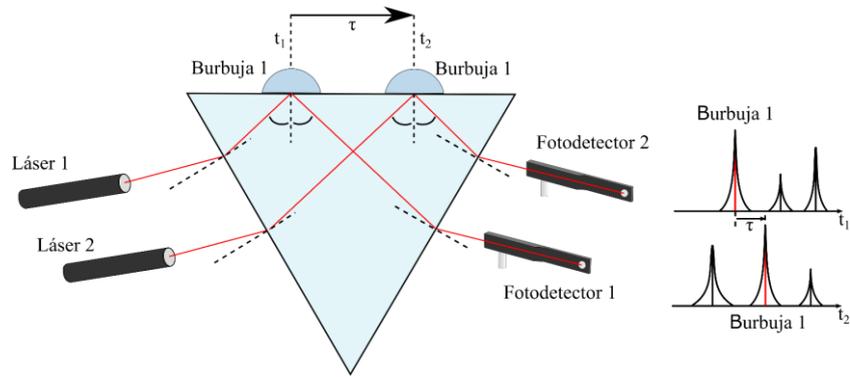


Figura 57: Esquema conceptual del sistema para el cálculo de velocidad mediante la correlación del reflejo de dos láseres.

## Referencias

- [1] C. T. Crowe, *Multiphase flow handbook*, CRC Press, 2005.
- [2] C. E. Brennen, *Fundamentals of multiphase flows*, Cambridge university press, 2005.
- [3] F. R. Young, *Cavitation*, World Scientific, 1999.
- [4] H. T. Falvey, *Cavitation in chutes and spillways*, United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Engineering Monograph No. 42., 1990.
- [5] E. E. Michaelides, C. T. Crowe y J. D. Schwarzkopf, *Multiphase Flow Handbook Second Edition*, CRC Press, 2017.
- [6] J. B. Freund, «Numerical Simulation of Flowing Blood Cells,» *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 46, pp. 67-95, 2014.
- [7] T. Matsuura, H. Fujita, O. Seki, K. Kashikura, K. Yamada y I. Kanno, «CBF Change Evoked by Somatosensory Activation Measured by Laser-Doppler Flowmetry: Independent Evaluation of RBC Velocity and RBC Concentration,» *The Japanese Journal of Physiology*, vol. 49, n° 3, pp. 289-296, 1999.
- [8] M. S. Albin, R. G. Carroll y J. C. Maroon, «Clinical considerations concerning detection of venous air embolism,» *Neurosurgery*, vol. 3, n° 3, pp. 380-384, 1978.
- [9] S. C. Palmon, L. E. Moore, J. Lundberg y T. Toung, «Venous air embolism: A review,» *Journal of Clinical Anesthesia*, vol. 9, n° 3, pp. 251-257, 1997.
- [10] C. E. Brennen, *Cavitation and bubble dynamics*, Cambridge University Press., 2013.
- [11] M. Čdina, «Detection of cavitation phenomenon in a centrifugal pump using audible sound,» *Mechanical systems and signal processing*, vol. 17, n° 6, pp. 1335-1347, 2003.
- [12] R. Mellen, «Ultrasonic spectrum of cavitation noise in water,» *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 26, n° 3, pp. 356-360, 1954.
- [13] D. Ross, *Mechanics of Underwater Noise*, Pergamon Press Inc., 1976.
- [14] S. Li, *Cavitation of hydraulic machinery*, vol. 1, World Scientific, 2000.
- [15] E. E. M. F. F. A. a. M. C. X. Escaler, «Detection of cavitation in hydraulic turbines,» *Mechanical systems and signal processing*, vol. 20, n° 4, pp. 983-1007, 2006.
- [16] R. R. P. S. E. B. a. J. S. G. Neill, «Detection of incipient cavitation in pumps using acoustic emission,» *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, vol. 211, n° 4, pp. 267-277, 1997.
- [17] H. M. D. a. C. B. C. S. Martin, «Cavitation inception in spool valves,» *Journal of fluids Engineering*, vol. 103, n° 4, pp. 564-576, 1981.
- [18] F. M. R. a. J. M. K.W. Frizell, «Cavitation potential of flow on stepped spillways,» *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 139, n° 6, pp. 630-636, 2012.
- [19] T. K. A. H. a. Y. M. S. Takahashi, «Cavitation noise measurement using a fiber-optic hydrophone,» *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 87, n° 6, pp. 2489-2492, 1990.

## Referencias

- [20] H. D. a. E. C. J. Bucaro, «Fiber-optic hydrophone,» *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 62, n° 5, pp. 1302-1304, 1977.
- [21] R. & G. Petkovšek, «A laser probe measurement of cavitation bubble dynamics improved by shock wave detection and compared to shadow photography,» *Journal of Applied Physics*, vol. 102, n° 4, 2007.
- [22] T. J. S. S. M. B. a. J. R. v. O. M. Rüdüsüli, «Bubble characterization in a fluidized bed by means of optical probes,» *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 41, pp. 56-67, 2012.
- [23] R. V. F. R. F. M. a. G. O. S. Guet, «Bubble velocity and size measurement with a four-point optical fiber probe,» *Particle & Particle Systems Characterization*, vol. 20, n° 3, pp. 219-230, 2003.
- [24] A. J. Peterka, Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators, United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Engineering Monograph No. 25., 1978.
- [25] J.-Y. Bouguet, «Pyramidal implementation of the affine lucas kanade feature tracker description of the algorithm,» *Intel Corporation*, vol. 5, n° 4, pp. 1-10, 2001.
- [26] D. G. Lowe, «Distinctive image features from scale-invariant keypoints,» *International journal of computer vision*, vol. 60, n° 2, pp. 91-110, 2004.
- [27] T. T. a. L. V. G. H. Bay, «Surf: Speeded up robust features,» *Computer vision ECCV 2006*, pp. 404-417, 2006.
- [28] Z. L. C. W. a. A. H. J. Lai, «Experimental measurement of the refractive index of biological tissues by total internal reflection,» *Applied optics*, vol. 44, n° 10, pp. 1845-1849, 2005.
- [29] H. L. a. S. Xie, «Measurement method of the refractive index of biotissue by total internal reflection,» *Applied optics*, vol. 35, n° 10, pp. 1793-1795, 1996.
- [30] A. K. a. M. Boehlau-Godau, «Spatially confined and temporally resolved refractive index and scattering evaluation in human skin performed with optical coherence tomography,» *Journal of Biomedical Optics*, vol. 5, n° 1, pp. 83-92, 2000.
- [31] F. B. N. G. S. A.-K. a. H. T. H. P. Adl, «A defective 1d photonic crystal based chemical sensor in total internal reflection geometry,» *IEEE Sensors Journal*, 2017.
- [32] L. C. W. L. K. a. R. P. V. D. A. J. Haes, «Detection of a biomarker for alzheimer's disease from synthetic and clinical samples using a nanoscale optical biosensor,» *Journal of the American Chemical Society*, vol. 127, n° 7, pp. 2264-2271, 2005.
- [33] I. Meglinski, Biophotonics for Medical Applications, Elsevier, 2015.
- [34] S.-F.-J. B.-S. H. L. a. Y.-J. C. J.-S. Chiu, «Application of total internal reflection and heterodyne interferometry in electrical conductivity measurements,» *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, n° 2, pp. 336-342, 2016.
- [35] T. Kuroda, Essential principles of image sensors, CRC press, 2014.

- [36] TELEDYNE DALSA, «Genie Nano M1280,» [En línea]. Available: <http://teledynedalsa.com/imaging/products/cameras/area-scan/genie-nano/G3-GM10-M1280/>. [Último acceso: 01 09 2017].
- [37] I. Matworks, «imaaq,» 2017. [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/products/imaaq..> [Último acceso: 08 08 2017].
- [38] J. L. D. M. a. J. T. J. A. Calleja López, Fotografía digital, Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, 2015.
- [39] AIA, «Gige Vision,» [En línea]. Available: <https://www.visiononline.org/vision-standards-details.cfm?type=5>. [Último acceso: 01 09 2017].
- [40] I. Teledyne DALSA, «Genie Nano,» 2017. [En línea]. Available: [http://info.teledynedalsa.com/acton/attachment/14932/f-0602/1/-/-/-/Genie\\_Nano\\_Family\\_datasheet.pdf](http://info.teledynedalsa.com/acton/attachment/14932/f-0602/1/-/-/-/Genie_Nano_Family_datasheet.pdf). [Último acceso: 2017 07 16].
- [41] S. S. R. H. Y. a. Z. L. T. Dai, «Detecting and preventing activex apimisuse vulnerabilities in internet explorer,» *International Conference on Information and Communications Security*, pp. 373-380, 2012.
- [42] R. K. a. K. Nakamatsu, *New Approaches in Intelligent Image Analysis: Techniques, Methodologies and Applications*, Springer, 2016.
- [43] R. Szeliski, *Computer vision: algorithms and applications*, Springer Science & Business, 2010.
- [44] R. J. Adrian y J. Westerweel, *Particle Image Velocimetry*, Cambridge University Press, 2011.
- [45] B. K. H. a. B. G. Schunck, «Determining optical flow,» *Artificial intelligence*, vol. 17, n° 1-3, pp. 185-203, 1981.
- [46] P. R. P. O. T. K. S. a. S. V. H. B. Zaman, *Advances in Visual Informatics: Third International Visual Informatics Conference, IVIC 2013, Selangor, Malaysia, November 13-15*, vol. 8237, Springer, 2013.
- [47] D. B. B. a. D. Valero, «Optical flow estimation in aerated flows,» *Journal of Hydraulic Research*, vol. 54, n° 5, pp. 575-580, 2016.
- [48] S. R. a. M. J. B. D. Sun, «Secrets of optical flow estimation and their principles,» *in Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2010 IEEE Conference on*, pp. 2432-2439, 2010.
- [49] Z. W. a. F. W. B. Fan, *Local Image Descriptor: Modern Approaches*, Springer, 2015.
- [50] A. V. a. B. Fulkerson, «Vlfeat: An open and portable library of computer vision algorithms,» *in Proceedings of the 18th ACM international conference on Multimedia*, pp. 1469-1472, 2010.
- [51] S. P. a. S. S. P. Panchal, «A comparison of sift and surf,» *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, vol. 1, n° 2, pp. 323-327, 2013.
- [52] T. Y. H. L. a. S. L. W. He, «Surf tracking,» *in Computer Vision, 2009 IEEE 12th International Conference on*, pp. 1589-1592, 2009.

## Referencias

- [53] W. T. a. E. Stamhuis, «Pivlab—towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in matlab,» *Journal of Open Research Software*, vol. 2, n° 1, 2014.
- [54] T. B. C. S. a. R. C. Y. Hassan, «Simultaneous velocity measurements of both components of a two-phase flow using particle image velocimetry,» *International journal of multiphase flow*, vol. 18, n° 3, pp. 371-395, 1992.
- [55] D. B. B. a. D. V. Huerta, «Image processing for bubble image velocimetry in selfaerated flows,» 2015.
- [56] E. B. G. a. C. G. M. S. Burbano de Ercilla, *Física General*, 1993.
- [57] M. Fox, *Optical properties of solids*, 2002.
- [58] A. Z. a. M. K.-G. K.-E. Peiponen, «Terahertz spectroscopy and imaging,» *Springer*, vol. 171, 2016.
- [59] C. Y. a. Z. C. X. Wang, *Progress in planar optical waveguides*, Springer, 2016.
- [60] E. Hecht, *Optics*, 4th, vol. 3, San Francisco: International edition, Addison-Wesley, 2002.
- [61] D. S. Langley and P. L. Marston, «Critical-angle scattering of laser light from bubbles in water: measurements, models, and application to sizing of bubbles,» *Applied optics*, vol. 23, n° 7, pp. 1044-1054, 1984.
- [62] S. Z. U. a. M. A. Talukder, «Reduction of detection volume in total internal reflection fluorescence microscopy using graphene,» in *Electrical and Computer Engineering (ICECE), 2016 9th International Conference on*, pp. 143-146, 2016.
- [63] K. S. a. N. C. S. H. Shaikh, «Moving object detection using background subtraction,» in *Moving Object Detection Using Background Subtraction*, pp. 15-23, 2014.
- [64] J. E. E. a. L. P. Maestre, *Fundamentos de procesamiento de imágenes*, Documentación Universidad Autónoma de Baja California, Unidad Tijuana, 2002.
- [65] S. H. S. a. K. S. N. Chaki, *Exploring image binarization techniques*, 2004.
- [66] Mathworks, Inc, «imbinarize,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/help/images/ref/imbinarize.html>. [Último acceso: 14 04 2017].
- [67] R. Klette, *Concise computer vision*, Springer, 2014.
- [68] Mathworks, Inc, «imbinarize,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/help/images/ref/imbinarize.html>. [Último acceso: 10 08 2017].
- [69] Mathworks, Inc, «medfilt2,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/help/images/ref/medfilt2.html>. [Último acceso: 16 07 2017].
- [70] S. Nagabhushana, «Computer vision and image processing,» New Age International, 2005.

- [71] Mathworks, Inc, «imerode,» 2017. [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/help/images/ref/imerode.html>. [Último acceso: 14 07 2017].
- [72] Mathworks, Inc., «strel class,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/help/images/ref/strel-class.html>. [Último acceso: 14 07 2017].
- [73] Mathworks, Inc, «imopen,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/help/images/ref/strel-class.html>. [Último acceso: 14 07 2017].
- [74] Mathworks, Inc, «bwareaopen,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/help/images/ref/bwareaopen.html>. [Último acceso: 14 07 2017].
- [75] Mathworks, Inc, «bwlabel,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/help/images/ref/bwlabel.html>. [Último acceso: 14 07 2017].
- [76] Mathworks, Inc, «regionprops,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/help/images/ref/regionprops.html>. [Último acceso: 14 07 2017].
- [77] K.-E. P. a. J. R. A. Jääskeläinen, «On reflectometric measurement of a refractive index of milk,» *Journal of dairy science*, vol. 84, n° 1, pp. 38-43, 2001.
- [78] H. H. Telle, A. G. Ureña y R. J. Donovan, *Laser Chemistry: Spectroscopy, Dynamics and Applications*, John Wiley & Sons, 2007.
- [79] D. & W. M. Sliney, *Safety with Lasers and Other Optical Sources: A comprehensive Handbook*, Springer Science & Business Media, 1980.
- [80] G. M. H. a. M. R. Querry, «Optical constants of water in the 200-nm to 200- $\mu$ m wavelength region».
- [81] I. Lighspan, «Ls-5246,» [En línea]. Available: <http://www.silicone-polymers.co.uk/pdf2007/LS-5246P.pdf>. [Último acceso: 24 07 2017].
- [82] E. S. a. A. DellÓro, «Spectral optical constants of ethanol and isopropanol from ultraviolet to far infrared,» *Optical Materials*, vol. 60, pp. 137-141, 2016.
- [83] Y. W. F. a. L. M. Y. W. M. M. Yunus, «Refractive index and fourier transform infrared spectra of virgin coconut oil and virgin olive oil,» *American journal of applied Sciences*, vol. 6, n° 2, p. 328, 2009.
- [84] S. H. a. R. B. Elvers, *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*, Wiley Online Library, 1989.
- [85] F. Shahidi, *Bailey's Industrial Oil and Fat Products*, 6 Volume Set, 2005.
- [86] M. P. a. P. A. Giguère, «Hydrogen peroxide and its analogues: I. density, refractive index, viscosity, and surface tension of deuterium peroxide–deuterium oxide solutions,» *Canadian journal of chemistry*, vol. 29, n° 2, pp. 173-181, 1951.
- [87] P. P. C. P. C. M. A. C. E. S. G. D. J.-P. a. A. F. J.-M. Trudeau, «Combined fibre-optic sensor for colour and refractive index (ci) monitoring,» *Measurement Science and Technology*, vol. 17, n° 5, p. 1134, 2006.

## Referencias

- [88] J. S. J. L. S. a. J. G. P. Schiebener, «Refractive index of water and steam as function of wavelength, temperature and density,» *Journal of physical and chemical reference data*, vol. 19, n° 3, pp. 677-717, 1990.
- [89] R. V. a. B. D. G. S. K. Srivastava, «Surface plasmon resonance based fiber optic sensor for the detection of low water content in ethanol,» *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 153, n° 1, pp. 194-198, 2011.

## **Abreviaturas y acrónimos**

<b>BIV:</b>	Bubble Image Velocimetry
<b>CLAHE:</b>	Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization
<b>CMOS:</b>	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
<b>FPS:</b>	Frames Per Second
<b>LED:</b>	Light-Emitting Diode
<b>PIV:</b>	Particle Image Velocimetry
<b>RBC:</b>	Red blood cells
<b>RMS:</b>	Root mean square
<b>SIFT:</b>	Scale Invariant Feature Transform
<b>SURF:</b>	Speeded Up Robust Feature
<b>TIR:</b>	Total Internal Reflection

## Anexos

## Anexo A. Índices de refracción de las muestras estudiadas

Tabla 11: Índices de refracción de las distintas sustancias bajo estudio.

Sustancia	Índice de refracción <sup>3</sup>	Temperatura (°C)
Agua [80]	1.3317	25
Fluido Óptico [81]	1.4578	25
2-propanol [82]	1.3763	Habitación
Etanol [82]	1.3598	Habitación
Aceite de oliva [83]	1.4650	25
Aceite de maíz [84]	1.4740 - 1.4760	20
Aceite de uva [85]	1.4740 - 1.4780	20
Peróxido de hidrógeno [86]	1.4067	25
Leche [77]	1.3525 - 1.3630	Habitación
Vino tinto [87]	1.33 – 1.38	21
Vapor de agua <sup>4</sup> [88]	1.000187	100

---

<sup>3</sup> Datos bibliográficos extraídos para una longitud de onda de 633 nm.

<sup>4</sup> El valor del índice de refracción es el correspondiente para una presión de 0.1 MPa.

# Anexo B. Caracterización de flujos emulsionados en estructuras hidráulicas mediante tecnología fotónica

## Caracterización de flujos emulsionados en estructuras hidráulicas mediante tecnología fotónica

Roberto Llorente<sup>a</sup>, Francisco J. Vallés-Morán<sup>b</sup>, María Morant<sup>a</sup>, Arnau Bayón<sup>b</sup>, Sergio L. Carrasco-Ortiz<sup>a</sup>, Eduardo Valero<sup>a</sup>, Santiago López<sup>c</sup> y Ana Belén Martín<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Centro de Tecnología Nanofotónica, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, Ed. 8F, 46022 Valencia (rllorent, mmorant, sercaror, edvahue)@ntc.upv.es, <sup>b</sup>Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, Ed. 8G, 46022 Valencia (fvalmo, arbabar)@iama.upv.es y <sup>c</sup>Iberdrola Generación Hidráulica, Explotación de Presas-Gestión y Desarrollo C/Tomás Redondo 1 E, 20833 Madrid (slopezro, abmartin)@iberdrola.es

Línea temática D. Estructuras hidráulicas.

B. Hidrología y gestión del agua. Riegos. Energía hidroeléctrica

### RESUMEN

La presente comunicación describe una nueva tecnología de monitorización de flujos multifase en estructuras hidráulicas y la estrategia de gestión asociada, desarrollada en el marco del proyecto HIDRASENSE cuyo consorcio está formado por Iberdrola Generación S.A. y la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), a través de sus institutos universitarios de investigación I.U.I. Centro de Tecnología Nanofotónica (UPV-NTC) y el I.U.I. de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (UPV-IIAMA). La metodología propuesta en este artículo contempla un sensor basado en tecnología fotónica para la caracterización de flujos multifase destinado a ser instalado en estructuras hidráulicas y sistemas de generación hidroeléctrica con el objetivo de monitorizar y controlar su funcionamiento. Dicho control puede contribuir a encontrar el punto de funcionamiento óptimo en términos de rendimiento hidroeléctrico y prevención de la aparición de cavitación, cuyas consecuencias pueden devenir catastróficas.

**Palabras clave** | Caracterización de flujos multifase; sensor fotónico; iluminación láser; procesado digital

### INTRODUCCIÓN

La detección y monitorización de burbujas en elementos críticos de la generación hidroeléctrica es importante por razones de eficiencia y seguridad. La cavitación es un fenómeno crucial en muchos ámbitos: En el ámbito hidráulico, la cavitación causa erosión en la superficie y, eventualmente, la destrucción de aliviaderos de presas y de otros elementos mecánicos y estructurales, reduciendo sensiblemente su vida útil. En relación a flujos supercríticos en canales hidráulicos como rápidas de aliviaderos, es frecuente la aparición del fenómeno conocido como autoaireación; fenómeno ya estudiado por la transferencia aire-agua de gases atmosféricos y por la reducción de los daños asociados a la cavitación (Chanson, 1995). En dispositivos tales como bombas y turbinas hidráulicas y hélices en el ámbito naval (barcos o submarinos), la cavitación causa mucho ruido, daño a los componentes, vibraciones, y una pérdida considerable de la eficiencia (Buckland et al., 2013). La estrategia de monitorización propuesta en este trabajo se realiza mediante sensado óptico, lo cual permite la detección de aire y partículas en suspensión en flujos multifásicos cuya fase principal es el agua. Esta monitorización tiene aplicación tanto a aliviaderos de presas como se muestra en la Figura 1(a), turbinas y tuberías a presión como se muestra en la Figura 1(b) y, en general, cualquier estructura hidráulica.

En este trabajo, la monitorización de variables como la detección de burbujas, su concentración, su velocidad y sus parámetros morfológicos (área, diámetro, semejes, solidez y perímetro) se realiza a partir de la detección de la dispersión de la luz láser junto con procesado digital. De esta manera, con un coste contenido, puede monitorizarse el flujo presente en un aliviadero. Esto supone un salto tecnológico en la gestión y operación de estructuras hidráulicas.

V Jornadas de Ingeniería del Agua. 24-26 de Octubre. A Coruña

ISBN: XXX-XX-XXXXX-XX-X

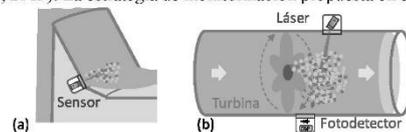


Figura 1 | Estrategia de gestión de flujos multifase propuesta en (a) rápidas de aliviaderos de presas y (b) conducciones.

## Anexo C. Photonic Sensing and Characterization of Multiphase Water Flows

### Photonic Sensing and Characterisation of Multiphase Water Flows *Computational Sensing and Imaging*

Sergio L. Carrasco-Ortiz, Eduardo Valero, Maria Morant and Roberto Llorente

*Nanophotonics Technology Center, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, Valencia, Spain*  
[sercaror@ntc.upv.es](mailto:sercaror@ntc.upv.es), [edvalue@ntc.upv.es](mailto:edvalue@ntc.upv.es), [mmorant@ntc.upv.es](mailto:mmorant@ntc.upv.es), [rllorent@ntc.upv.es](mailto:rllorent@ntc.upv.es)

**Keywords:** Computational sensing, photonic sensor, imaging, CMOS, multiphase water flow, cavitation, air fraction, bubble speed.

**Abstract:** This paper presents and demonstrates experimentally a photonic sensor based on laser excitation and CMOS array detection of light interactions in a bubbling water column. Bubbling water columns are multiphase water flows, which can be produced by cavitation effect in screws and pump-jets, or by water-air mixing in the dam intakes and spillways in hydroelectric energy generation plants. The proposed optical sensor comprises a CMOS array with a polymeric tuneable optical lens sampling the area illuminated by a diode laser operating at 532 nm. By computational imaging, the sensor is able to measure the size, shape and speed of the bubbles inside the water column and the corresponding air concentration. The developed laser-assisted sensor is demonstrated experimentally in the laboratory with a water column at 0.05 MPa with good results employing Optical Flow, SIFT and SURF computational methods.

#### 1 INTRODUCTION

Bubble detection and multiphase flow monitoring are important in terms of efficiency and safety in many industrial and medical fields. A multiphase flow is defined as a simultaneous flux of two phases or components with an explicit interface between them (Iver, et al., 2013). A basic example of a two-phase flow usually comprises a gas and a liquid, being the most common bubble flows (Bian, et al., 2011). Bubble flows play an important role in the study of mechanism in gas/liquid two-phase flows where the bubbles behaviour are a key element when monitoring water columns in industrial applications (Bian, et al., 2011). Some application examples of two-phase flows are air bubbles found in extracorporeal blood circuits of haemodialysis (Li, et al., 2015) or in industrial bubble column reactors (Iver, et al., 2013). In the first example, in medical applications, if a certain amount of air is pumped into the patient, it may cause life-threatening coagulation and haematomas (Li, et al., 2015). In the second example, it is extremely important to know the properties of the bubbles including its size, shape and velocity for the design and function monitoring of industrial reactors (Iver, et al., 2013). In both cases, image processing of bubbles has been proposed to

calculate the number of bubbles and cumulative volume (Jonsson, 2014) (Muddle, et al., 1994).

A large number of bubbles in a flow can indicate the presence of cavitation in hydraulic applications. Cavitation is due to the pressure decrease generated by an excessive blade angular velocity, which in turn generates bubbles that explode in the blade surface (Brennen, 2005). Cavitation spaces are usually involved in highly turbulent flows as it happens in vortex emissions produced in the torch effect represented in Figure 1(a). Bubble explosion causes erosion on the surface of dam spillways, reducing its useful life (ETH Zurich, Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology, s.f.) as it is depicted in Figure 1(b).

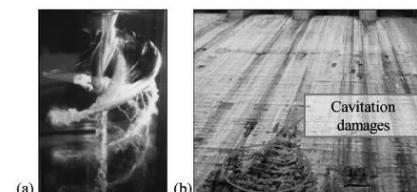


Figure 1: (a) Torch effect in a screw (b) Cavitation damage on spillway profile of Nagarjunasagar Dam.

# Anexo D. Diluted Chemical Identification by Total Internal Reflection Photonic Sensing

## Diluted Chemical Identification by Total Internal Reflection Photonic Sensing *Biomedical Optics*

Eduardo Valero, Sergio L. Carrasco-Ortiz, Maria Morant and Roberto Llorente  
*Nanophotonics Technology Center, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, Valencia, Spain*  
*edvahue@ntc.upv.es, sercaror@ntc.upv.es, mmorant@ntc.upv.es, rllorent@ntc.upv.es*

Keywords: Photonic sensor, Bio-chemical sensing, Image processing

Abstract: A novel optical sensor architecture for the rapid identification of liquid samples is proposed and evaluated experimentally. The proposed architecture is based on total internal reflection transmission of a laser beam. A CMOS sensor is used to acquire the reflection produced by a narrow laser beam when interacting with the liquid sample on the surface of an equilateral prism. Using digital image processing techniques, the critical angle of the transmission is calculated and the identification of the refractive index of the liquid sample is obtained. In the present work, distinct liquid substances were evaluated experimentally using a red He-Ne laser at 632.8 nm wavelength obtaining the refractive index with a deviation of less than 0.0014 from the theoretical value. Sensing by refractive index changes are of great importance in biomedical (e.g. optical diagnosis and laser treatments) and chemical applications

### 1 INTRODUCTION

In the last decades, the design of sensors has evolved combining the fundamental biological, chemical, and physical sciences with engineering and computer science to fulfil concrete needs in a wide range of application areas (Adl, et al., 2017). In both medical and industrial applications, optical biosensors have gained attention in the last years due to their simplicity and high sensitivity (Adl, et al., 2017). Optical biosensors can be applied to detect early diseases (Haes, et al., 2005) measure biomolecular assays (Meglinski, 2015) or industrial applications like process monitoring in plant factories (Chiu, et al., 2016).

In this work, we propose and demonstrate experimentally a prism-based optical sensor for the detection and identification of the refractive index of liquid samples. The refractive index of a material is a characteristic optical parameter that describes the speed of light ratio of the material in respect of its propagation speed in vacuum. Albeit there are some techniques that have been proposed for measuring the refractive index (Lai, et al., 2005), the majority are based on the measurement of light intensity fluctuations by a photodetector (Li & Xie, 1996). The proposed sensor is based on total internal reflection

(TIR) propagation, which permits detection of changes in the beam position or refractive index variations caused by the biological sample interacting in the sensor surface (Watad, et al., 2015). The sensor is intended to be integrated close to the optics in conventional CCD camera, as found in today's cellphones, targeting a cost-effective implementation of a complete bio-chemical identification system.

The proposed prism-based sensor concept is described in Figure 1, where a laser beam propagates through a medium with high refraction index (i.e. the prism with refractive index  $n_{prism}$ ) and encounters a planar interface with a medium of lower refraction index (water or other liquid sample with  $n_{sample} < n_{prism}$ ). Total internal reflection occurs for incidence angles greater than the critical angle ( $\theta_i > \theta_c$ ) (Uddin & Talukder, 2016).

Following this approach, in this work we measure experimentally different liquid samples, searching TIR transmission in a prism to obtain the critical angle for each substance. In these experiments, the critical angle is measured by means of the acquisition of frames with a high-speed camera using proper digital image processing techniques as described in this paper. The accurate determination of critical angle on different substances may result on more