



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Comunicaciones

Diseño, fabricación y caracterización de microlentes de
hidrogel para la creación de sensores ópticos

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Tecnologías, Sistemas y Redes de
Comunicaciones

AUTOR/A: Ruiz de la Torre Bertolín, Diego

Tutor/a: García Rupérez, Jaime

Cotutor/a: Ponce Alcántara, Salvador

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

Agradecimientos

No creo que en tan pocas frases pueda mostrar toda mi gratitud. Gracias a Jaime y a Salva, por su paciencia, y por enseñarme tanto a cambio de tan poco. A todos los del Centro de Tecnología Nanofotónica que algún día me dedicaron su tiempo y me compartieron sus conocimientos. A todos esos profesores, asistentes, alumnos y compañeros que me dieron buenos motivos para que siempre me acuerde de ellos. A Brito, Juanjo, Simón, César y Luis que empezaron esto conmigo y hoy en día me siguen acompañando. A mi padre y a mi madre, por enseñarme con su amor y con su ejemplo. Y también a mis hermanos, porque están siempre conmigo.

Este trabajo tiene especial dedicación a todas esas personas que me quieren y que quiero.

“Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad”

Albert Einstein

Resumen

En este Trabajo Final de Máster se ha diseñado un setup para la caracterización de microlentes de hidrogel con la intención de crear un sensor óptico. El hidrogel es un compuesto químico transparente creado a partir de polímeros que aumenta su volumen y expande su forma cuando entra en contacto con medios acuosos. Durante este proyecto, se han utilizado diferentes compuestos de hidrogel que, al ser hidratados, aumentaban su volumen y con ello alteraban el trayecto de los haces de luz láser incidentes sobre la misma gota de hidrogel.

Previo a los montajes experimentales, se utilizaron softwares de simulación fotónica con objetivo de caracterizar la respuesta de la microlente de hidrogel. RSoft es una herramienta de simulación óptica que cuenta con distintos métodos de computación en el cual se estuvieron realizando algunas simulaciones. Aquí, se estuvo variando algunos parámetros fundamentales; como el diámetro de la microlente, el material o el ángulo de incidencia de la luz, y se obtuvieron los primeros resultados teóricos.

A continuación, se llevaron a cabo las pruebas experimentales. En primera instancia, se utilizó un montaje experimental temporal en el que se incidía verticalmente con una fuente láser sobre gotas de tamaño reducido compuestas por materiales provisionales con objetivo de obtener las primeras estimaciones del punto de enfoque (spot). Más adelante, se pasó al montaje experimental definitivo en el que se incidía, con hasta 3 fuentes de luz diferentes, de manera horizontal, a gotas de distintos hidrogeles elaboradas en laboratorio. Una cámara especial se utilizaba para captar en el interior de su objetivo las variaciones de enfoques de luz debidas a las hidrataciones producidas, y, posteriormente procesaba estos datos que serían tratados.

Conectado a esta maqueta experimental, se tenía un ordenador que procesaba las imágenes y los datos recogido por la cámara. Inicialmente, se estuvo trabajando con el propio software del fabricante, Pylon, para controlar los ajustes y los parámetros fundamentales de la cámara. Más tarde, se elaboró un programa en LabView que permitía al usuario controlar y ajustar los parámetros fundamentales de la cámara, observar en tiempo real la imagen capturada por la cámara, guardar imágenes y almacenar datos, para su posterior tratamiento en Excel.

Durante el desarrollo del trabajo, se han llevado a cabo numerosos retos y mejoras que han ido acondicionándose a lo largo de las pruebas experimentales y de las necesidades del proyecto. Por ello, además de los objetivos iniciales, también se han cumplido hitos que han permitido adecuarse a la calidad de los experimentos.

Este proyecto inicia una línea de investigación de la fotónica que permite a próximas generaciones seguir un camino de pruebas experimentales con microlentes de hidrogel y que quizás algún día, pueda dar lugar a algo importante.

Palabras clave: Microlente, hidrogel, láser, sensor óptico, hidratación, fotónica, spot de luz, LabVIEW, Rsoft.

Resum

En aquest Treball de Final de Màster s'ha dissenyat un muntatge per a la caracterització de microlents d'hidrogel amb la intenció de crear un sensor òptic. L'hidrogel és un compost químic transparent creat a partir de polímers que augmenta el seu volum i expandeix la seua forma quan entra en contacte amb mitjans aquosos. Durant aquest projecte, s'han utilitzat diferents compostos d'hidrogel que en ser hidratats augmentaven el seu volum i amb això alteraven el trajecte dels feixos de llum làser incidents sobre la mateixa gota d'hidrogel.

Previ als muntatges experimentals, es van utilitzar softwares de simulació fotònica amb objectiu de caracteritzar la resposta de la microlent d'hidrogel. RSoft és una eina de simulació òptica que compta amb diferents mètodes de computació. Després de triar el programari que millor s'adequava a les nostres proves experimentals, es van estar realitzant simulacions variant alguns paràmetres fonamentals, com el diàmetre de la microlent, el material o l'angle d'incidència de la llum, per a caracteritzar els primers resultats de manera teòrica.

A continuació, es van dur a terme les proves experimentals. En primera instància, es va utilitzar un muntatge experimental temporal en el qual s'incidia verticalment amb una font làser amb objectiu d'obtenir les primeres estimacions sobre els punts d'enfocament (espot). Més endavant, es va passar al muntatge experimental definitiu en el qual s'incidia, amb fins a 3 fonts de llum diferents, de manera horitzontal, a gotes de diferents hidrogels elaborades en laboratori. Després del portaobjectes de les gotes d'hidrogel, es col·locava una càmera especial que captava a l'interior del seu objectiu les variacions d'enfocaments de llum degudes als drenats i enviava aquesta informació a l'ordinador.

Connectat a la maqueta experimental, es tenia un ordinador que processava el tractament d'imatges i dades recollit per la cambra. Primer, es va estar treballant amb el propi programari del fabricant, Pylon, per a controlar els ajustos i els paràmetres fonamentals de la cambra. Després, es va elaborar un programa en LabView que permetia a l'usuari controlar i ajustar els paràmetres fonamentals de la cambra, observar a temps real la imatge capturada per la cambra, guardar imatges i emmagatzemar dades, per al seu posterior tractament en Excel.

Durant el desenvolupament del treball, s'han dut a terme nombrosos reptes i millores que han anat condicionant-se al llarg de les proves experimentals i de les necessitats del projecte. Per això, a més dels objectius inicials, també s'han realitzat millores per a adequar-se a la qualitat dels experiments.

Aquest projecte inicia una línia d'investigació fotònica que permet a pròximes generacions seguir un camí de proves experimentals amb micro lents d'hidrogel i que potser algun dia, puge donar lloc a una cosa important.

Paraules clau: microlent, hidrogel, làser, sensor òptic, hidratació, fotònica, espot de llum, LabVIEW, Rsoft.

Abstract

In this master's Final Project, an assembly has been designed for the characterization of hydrogel microlenses with the intention of creating an optical sensor. Hydrogel is a transparent chemical compound created from polymers that increases in volume and expands in shape when in contact with aqueous media. During this project, different hydrogel compounds have been used which, when hydrated, increased their volume and thereby altered the path of the incident laser light beams on the same drop of hydrogel.

Prior to the experimental setups, photonic simulation software was used in order to characterize the response of the hydrogel microlens. RSoft is an optical simulation tool that has different computation methods. After choosing the software that best suited our experimental tests, simulations were carried out by varying some fundamental parameters, such as the diameter of the microlens, the material or the angle of incidence of the light, to characterize the first results theoretically.

Next, the experimental tests were carried out. In the first instance, a temporary experimental set-up was used in which a laser source was incised vertically to obtain the first estimates of the focus points (spot). Later, the definitive experimental set-up was carried out, in which drops of different hydrogels made in the laboratory were influenced horizontally with up to 3 different light sources. Behind the slide of the hydrogel drops, a special camera was placed that captured the variations in light focus due to the drains inside its objective and sent this information to the computer.

Connected to the experimental model, there was a computer that processed the processing of images and data collected by the camera. First, it was working with the manufacturer's own software, Pylon, to control the fundamental settings and parameters of the camera. Later, a program was developed in LabView that allowed the user to control and adjust the fundamental parameters of the camera, observe the image captured by the camera in real time, save images and store data, for later treatment in Excel.

During the development of the work, numerous challenges and improvements have been carried out that have been conditioned throughout the experimental tests and the needs of the project. For this reason, in addition to the initial objectives, improvements have also been made to adapt to the quality of the experiments.

This project initiates a line of photonic research that allows future generations to follow a path of experimental tests with hydrogel microlenses and that perhaps one day, may lead to something important.

Keywords: Microlens, hydrogel, laser, optical sensor, hydration, photonics, light spot, LabVIEW, Rsoft.

Índice general

Agradecimientos	II
Índice general	VI
Índice de figuras	VII
Índice de Tablas	IX
1 Introducción	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos	2
2 Estado del arte	3
2.1 Sensores ópticos	3
2.2 Hidrogel y su síntesis	3
2.3 Física de las lentes.....	4
3 Simuladores	5
3.1 FullWave	5
3.2 BeamProp.....	7
3.2.1 Variaciones del diámetro de la gota de hidrogel	9
3.2.2 Variaciones del material de la lente de hidrogel.....	10
4 Diseños de montajes experimentales	11
4.1 Cámara	11
4.2 Fuentes de luz láser	11
4.3 Microlentes.....	12
4.4 Realización de las pruebas de sensado	13
4.5 Diseño experimental inicial.....	13
4.6 Diseño experimental final	15
5 Software de control del setup de medida	17
5.1 Pylon Viewer Basler Software	17
5.2 LabVIEW	18
6 Pruebas realizadas con láser rojo ($\lambda=660$ nm)	19
6.1 Pruebas de estabilidad fuente de láser rojo	20
6.2 Medidas con la lente de un cabezal de DVD	21
6.3 Primeras medidas con lentes de hidrogel y con hidratación	22
6.3.1 Medidas de D-1/2 BSA fluyendo agua desionizada y Cloruro de Sodio (NaCl).....	23
6.4 Medidas Hidrogel D-TEA con deposición NaCl	25
6.5 Medidas D-TEA con Cloruro de Calcio.....	27
7 Pruebas realizadas con láser verde ($\lambda=534$ nm)	29
7.1 Prueba de estabilidad con láser verde	29
7.2 Medidas D-1/2 BSA con 10 mg/ml de CaCl ₂	30
7.3 Lente de hidrogel D-1/2 BSA aplicando 5 y 20 ml/mg de CaCl ₂	31
7.4 Medidas de secado gota hidrogel	32
7.5 Lente de hidrogel D-1/2 BSA con 5 ml/mg de NaCl y 20 ml/mg de NaCl	32
8 Pruebas realizadas con fuente de luz blanca	34
8.1 Medidas D-TEA con DIW	34
8.2 Medidas D-TEA con 20 ml/mg NaCl	35
8.3 Medidas D-TEA aplicando hasta 4 veces 5 ml/mg NaCl.....	36
9 Conclusiones	38

Propuesta de trabajo futuro	39
Bibliografía	40
Anexos	41
Glosario de términos	41
Abreviaturas	41
Diagrama de bloques del programa de LabView	42
Procesos de fabricación de las microlentes de hidrogel	44

Índice de figuras

<i>Figura 1: Centro Tecnológico de Investigación Nanofotónica en la UPV</i>	1
<i>Figura 2: Sala limpia o sala blanca de clase 10 en el NTC</i>	2
<i>Figura 3: Ley de Snell con los 4 posibles casos, respectivamente (elaboración propia)</i>	4
<i>Figura 4: Primer diseño de simulación en FullWave</i>	5
<i>Figura 5: Resultados de simulación variando el ancho de la fuente de excitación para 0.5, 1 y 5 μm, izquierda, derecha y abajo, respectivamente</i>	6
<i>Figura 6: Resultados de simulación variando el tipo de onda de excitación para Gaussiana, Rectangular, Multimodo y SlabMode, (izquierda a derecha, arriba abajo, respectivamente)</i>	6
<i>Figura 7: Semiesfera de hidrogel con los 4 puntos incidentes desde donde se ha simulado</i>	6
<i>Figura 8: Directividad de haces de luz incidiendo perpendicularmente sobre la semiesfera de hidrogel desde distintos ángulos: 0°, 5°, 21° y 30°</i>	7
<i>Figura 9: Índices de refracción del Agua ($n=1.33$), Dióxido de silicio ($n=1.45$) y PMMA ($n=1.48$), respectivamente</i>	7
<i>Figura 10: Simulaciones variando el Launch Width: a) 2 mm, b) 3 mm, c) 4 mm, d) 5 mm, e) 6 mm, f) 7 mm, g)8 mm</i>	8
<i>Figura 11: Gráfica de resultados de las simulaciones variando el Launch Width</i>	9
<i>Figura 12: Simulaciones variando el tamaño de la gota: a) radio= 1000 μm, b) radio=2000 μm, c) radio= 3000 μm</i>	9
<i>Figura 13: Simulaciones variando el índice de refracción: a) $n= 1.35$, b) $n=1.40$, c) $n=1.45$, d) $n=1.4846$ (PMMA)</i>	10
<i>Figura 14: Gráfica de las simulaciones variando el índice de refracción</i>	10
<i>Figura 15: Cámara ace Basler acA640-750um y su eficiencia cuántica vs longitud de onda</i>	11
<i>Figura 21: Fuente de luz láser roja (izq) y verde (der)</i>	12
<i>Figura 17: Fuente de luz blanca atravesando lente de hidrogel</i>	12
<i>Figura 18: Dos gotas de DIW de 4 mm de diámetro (color rojo y transparente) y dos gotas de PMMA depositadas sobre obleas de silicio</i>	12
<i>Figura 19: Placa Petri con las 3 láminas de hidrogel</i>	13
<i>Figura 20: Deposito de un fluido determinado, con una jeringuilla, sobre la lámina de hidrogeles (izquierda), y líquido depositado sobre lente de hidrogel (derecha)</i>	13
<i>Figura 21: Diseño estructural del montaje experimental preliminar</i>	14
<i>Figura 22: Esquema del montaje experimental final</i>	15
<i>Figura 23: Estructuras deslizantes del soporte porta - muestras y de la cámara, y separación entre ellas</i>	15

<i>Figura 24: Placa de Petri con las 3 láminas de gotas de hidrogel contenidas en su interior: D-1/2-BSA, D-TEA y M</i>	16
<i>Figura 25: Punto concentrado de luz en el interior de la cámara tras la hidratación de las microlentes de hidrogel</i>	16
<i>Figura 26: Interfaz de Pylon Viewer capturando el spot de luz del láser, cuando incide de forma directa</i>	17
<i>Figura 27: Interfaz usuario máquina del programa diseñado en LabVIEW</i>	18
<i>Figura 28: Camino seguido por el haz de luz al incidir sobre la lente de hidrogel depositada sobre lámina de vidrio</i>	19
<i>Figura 29: Incidencia con fuente ancha sobre la curvatura de lente de hidrogel para hallar el</i>	20
<i>Figura 30: Prueba de estabilidad del láser rojo</i>	20
<i>Figura 31: Captura de pantalla del programa cuando se alejó el cabezal de DVD 1 mm con respecto a la cámara (izquierda) y después cuando se acercó 0.5 mm (derecha)</i>	21
<i>Figura 32: Configuración alineada del montaje con fuente de luz láser roja (arriba izquierda), con el spot en el interior de la cámara tras atravesar microlente (arriba derecha) y porta muestras separado a 2 cm del objetivo de la cámara (abajo)</i>	22
<i>Figura 33: Punto de enfoque de luz roja al atravesar microlente de hidrogel M sobre una pantalla opaca</i>	22
<i>Figura 34: Spot de luz de microlente de hidrogel D-1/2 BSA con luz láser roja incidente (izquierda), tras 5 (centro) y tras 10 minutos (derecha)</i>	23
<i>Figura 35: Spot de hidrogel D-1/2 BSA (izquierda) y tras hidratación con DIW (derecha)</i>	23
<i>Figura 36: Spot de luz láser rojo formado cuando se ha hidratado DIW: estado inicial (1ª fila izquierda), reacciones, post reacción (2ª fila centro) y estado final (2ª fila derecha)</i>	24
<i>Figura 37: Spot de luz láser rojo formado cuando se ha hidratado una concentración de 20 mg/ml de NaCl: reacciones y estado final (2ª fila derecha)</i>	24
<i>Figura 38: Prueba de D-1/2 BSA aplicando DIW y distintas concentraciones de NaCl</i>	25
<i>Figura 39: Prueba con Hidrogel D-TEA tras deposiciones de 5, 10 y 20 ml/mg de NaCl</i>	26
<i>Figura 40: Estado inicial del spot atravesando el Hidrogel D-TEA</i>	26
<i>Figura 41: Reacción del spot tras deposiciones de 5 mg/ml de NaCl</i>	26
<i>Figura 42: Reacción del spot tras deposiciones de 10 mg/ml de NaCl</i>	26
<i>Figura 43: Reacción del spot tras deposiciones de 20 mg/ml de NaCl</i>	26
<i>Figura 44: Gráfica de la prueba de Hidrogel D-TEA aplicando 5, 10 y 20 mg/ml de CaCl₂</i>	27
<i>Figura 45: Estado inicial del spot de luz formado al atravesar el hidrogel D-TEA</i>	27
<i>Figura 46: Spot de luz obtenidos con hidrogel D-TEA tras aplicar CaCl₂ 5 mg/ml</i>	28
<i>Figura 47: Spot de luz obtenidos con hidrogel M tras aplicar de nuevo CaCl₂ 5 mg/ml (2)</i>	28
<i>Figura 48: Spot de luz obtenidos con hidrogel D-TEA tras aplicar CaCl₂ 10 mg/ml</i>	28
<i>Figura 49: Spot de luz obtenidos con hidrogel M tras aplicar CaCl₂ 20 mg/ml</i>	28
<i>Figura 50: Spot de luz obtenidos con hidrogel M tras aplicar DIW</i>	28
<i>Figura 51: Spot de luz verde incidiendo directamente en la cámara (izquierda) y spot capturado (derecha)</i>	29
<i>Figura 52: Prueba de estabilidad de láser verde con media móvil durante 13 minutos</i>	29
<i>Figura 53: Gráfica prueba D-1/2 BSA aplicando 10 ml/mg de CaCl₂, e iluminado con el láser verde</i>	30

<i>Figura 54: Spots de luz capturado en presencia de 10 ml/mg de CaCl₂ sobre D-1/2 BSA estado inicial (1ª fila izquierda), reacción (1ª fila centro), reacción 2(1ª fila derecha), reacción 3(2ª fila izquierda), estado final (2ª fila derecha)</i>	<i>30</i>
<i>Figura 55: Gráficas prueba D-1/2 BSA con deposición de 5 y 20 ml/mg CaCl₂, empleando el láser verde.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 56: Spots de luz capturado en presencia de 5 y 20 ml/mg de CaCl₂ sobre D-1/2 BSA estado inicial (1ª fila izquierda), máximo 1 (1ª fila centro), máximo 2 (1ª fila derecha), máximo 3 (2ª fila izquierda), estado final (2ª fila derecha)</i>	<i>31</i>
<i>Figura 57: Spot de luz capturado por la cámara (izquierda) tras tratado con programa en LabView (tiempo de exposición, ganancia, gamma) (derecha).....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 58: Spot de luz capturado por la cámara tras 30 mins (izquierda), 35 mins (centro) y 40 mins (derecha).....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 59: Gráfica prueba D-1/2 BSA aplicando 5 ml/mg y 20 ml/mg de NaCl.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 60: Spots de luz capturado al aplicar 5 ml/mg y 20 ml/mg de NaCl sobre D-1/2 BSA: estado inicial (1ª fila izquierda), desvanecimiento 1 (1ª fila centro), reacción (1ª fila derecha), estado intermedio (2ª fila izquierda), desvanecimiento 2 (2ª fila centro), estado final (2ª fila derecha)</i>	<i>33</i>
<i>Figura 61: Sensor de la cámara con spot de luz blanca tras incidir en una lente de hidrogel</i>	<i>34</i>
<i>Figura 62: Perfil experimental con la fuente de luz blanca y su imagen capturada por el programa de LabView.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 63: Gráfica prueba D- TEA con DIW con luz blanca</i>	<i>35</i>
<i>Figura 64: Spot capturado por la cámara cuando se incide con luz blanca: estado inicial (izquierda), desvanecimiento (derecha), estado final (abajo).....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 65: Gráficas prueba D-TEA con 20 ml/mg NaCl con luz blanca.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 66: Spot capturado por la cámara cuando se incide con luz blanca y se aplica 20 ml/mg de NaCl: estado inicial (izquierda), desvanecimiento (derecha), estado final (abajo).....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 67: Gráficas pruebas de D-TEA con 5 ml/mg NaCl con luz blanca: valor promedio (arriba) y ancho spot (abajo)</i>	<i>37</i>
<i>Figura 68: Prueba D-TEA con 4 aplicaciones 5 ml/mg NaCl: estado inicial (1ª fila izquierda), desvanecimiento 1 (1ª fila centro), desvanecimiento 2 (1ª fila derecha), desvanecimiento 3 (2ª fila izquierda), desvanecimiento 4 (2ª fila centro), estado final (2ª fila derecha)</i>	<i>37</i>
<i>Figura 69: Diagrama de bloques del software diseñado en LabVIEW.....</i>	<i>42</i>

Índice de Tablas

<i>Tabla 1: Tabla y gráfica de resultados de los estrechos formados en el interior del cono y sus puntos de convergencia en el eje Z en función del Launch Width</i>	<i>8</i>
<i>Tabla 2: Composición de las gotas llevadas a análisis.....</i>	<i>44</i>

CAPÍTULO 1

Introducción

1.1 Motivación

La nanofotónica es un campo de la ciencia que estudia a escala nanométrica el comportamiento de la materia cuando interactúa con fotones de luz. Es una rama de la ciencia que cuelga de la física óptica, pero también de la ingeniería óptica, ingeniería eléctrica y la nanotecnología. Este término, generalmente hace referencia a situaciones que involucran longitudes de onda en la escala nanométrica, como: la luz UV, la luz visible o la luz IR. La interacción de la luz suele alterar las propiedades físicas y químicas de ciertos compuestos, lo que provoca modificaciones de su forma, estado, aspecto y da lugar a reacciones únicas. Aunque esta vertiente de la ciencia no es novedosa y se remota a cientos de años atrás, no es hasta la segunda mitad del siglo pasado donde tuvo una repercusión importante en la investigación científica. Sus grandes aplicaciones industriales como; la creación de nuevos nanomateriales más resistentes y ligeros. Además, su impacto en la industria electrónica, entre otros, le permiten a la nanotecnología introducirse al mundo de las tecnologías modernas de comunicación. La nanofotónica también ofrece soluciones biomédicas para la detección y diagnóstico, marco en el cual se encaja este Trabajo de Fin de Máster. Aunque cuenta con una extensa variedad de aplicaciones, estos son solo algunos ejemplos que convierten a la nanofotónica en una de las especialidades de la ciencia con mayor potencial en la actualidad.

El Centro Tecnológico de Nanofotónica (NTC, por sus siglas en inglés) es un centro de investigación ubicado en la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) que diseña, modela, fabrica y desarrolla nanotecnología utilizando técnicas de fabricación para un gran conjunto de aplicaciones. Entre una variedad de actividades, los principales grupos del NTC investigan y desarrollan nuevas tecnologías para redes ópticas y sistemas fotónicos, fotónica integrada en dispositivos, fotónica integrada en sistemas y aplicaciones, fotónica para uso fotovoltaico, plasmónica y optomecánica, fotónica en la banda de THz y procesamiento óptico de señal, y biosensores fotónicos.



Figura 1: Centro Tecnológico de Investigación Nanofotónica en la UPV

Este reconocido centro de investigación no solo destaca por su alto nivel de investigación, sino que, popularmente, también es conocido por su sala blanca o sala limpia en la que se estudian materiales únicos. A la sala limpia del NTC se le denomina de tal manera debido al nivel de pureza que contiene el aire del ambiente. Se dice que es de clase 10 porque el aire contenido en el interior de la sala puede tener hasta 10 partículas de $0,5 \mu\text{m}$ en suspensión por metro cúbico.



Figura 2: Sala limpia o sala blanca de clase 10 en el NTC

1.2 Objetivos

El principal objetivo de este trabajo ha consistido en la utilización de una microlente de hidrogel para la creación de sensores ópticos. Aunque existen una gran variedad de sensores ópticos con sus distintos mecanismos, en este proyecto se quería desarrollar uno para detectar como cambia la respuesta de la estructura fotónica, que en este caso es una lente de hidrogel, al estar en presencia de un determinado compuesto líquido . Es decir, el sensor se basa en una microlente realizada con un compuesto inorgánico. Ésta deforma su aspecto al entrar en contacto con líquidos. Como fuente de luz se emplea un haz colimado procedente de una fuente láser. El desenfoque asociado a la modificación de las características de la lente es recogido por una cámara monocromática y tratado con un software. A esta lente de hidrogel se le proporciona durante las medidas agua con distintas concentraciones de sal para observar la variación de su punto de enfoque. Dicho comportamiento es recogido por una cámara.

Las lentes de hidrogel se han depositado en un portaobjetos de vidrio. Éste se ha situado sobre un rail óptico, permitiendo modificar la posición de la lente con respecto a la cámara, con la intención de enfocar inicialmente el spot de luz. Esto se debe a que, a pesar de las simulaciones realizadas, siempre es conveniente tras la alineación del sistema, regular este parámetro con objetivo de visualizar una correcta imagen a tratar.

Además de este propósito inicial, se han planteado otros hitos a cumplir surgidos a raíz de los desafíos encontrados:

- La obtención de resultados simulados previos para la determinación de la distancia y tamaño del punto de luz
- La realización de un setup de medida
- La correcta concentración del spot del láser generado por la microlente
- La selección del tipo de hidrogel óptimo para realizar las microlentes
- La creación de un diseño de software controlable por el usuario
- La propuesta de mejoras de medida por software
- La importancia del uso de una fuente de alimentación estable para el láser
- La comparación de los resultados simulados con los obtenidos experimentalmente

CAPÍTULO 2

Estado del arte

2.1 Sensores ópticos

Los sensores ópticos son mecanismos de detección, capaces de detectar variaciones químicas, físicas y biológicas con la interacción de la luz sobre la materia. Estos cambios son producidos en las propiedades del compuesto vienen afectados por las características de la luz como la longitud de onda utilizada, la polarización, fase, amplitud, la respuesta espectral o incluso la ausencia de esta. Este fenómeno se refleja en un sensor de luz que recoge las alteraciones de la intensidad de la luz recibida y las convierte a formato digital.

Hoy en día, existe una numerosa cantidad de aplicaciones de sensores ópticos en todos los campos de estudio, como en la salud ^[1], en la ingeniería o en la ciencia. Una pistola láser con la que te miden la temperatura en la frente, la energía que un particular puede obtener gracias al uso de placas fotovoltaicas o las nuevas imágenes que vemos de los agujeros negros gracias a un telescopio espacial, son algunos de los ejemplos más comunes de sensores ópticos que nos rodean en el día a día ^{[2] [3] [4]}.

Aunque en cada uno de estos ejemplos los métodos sean diferentes, todos ellos tienen el mismo objetivo común: detectar variaciones producidas en algún material y transformarlo a formato digital para su posterior tratamiento e interpretación. Al igual que se hace en este proyecto.

En este caso, el sensor óptico es toda una maqueta experimental creada en un laboratorio de biofotónica donde, con la modificación en las características de una lente de hidrogel durante pasos de sensado, se obtienen variaciones en su punto de enfoque que son posteriormente tratadas por programas de ordenador.

2.2 Hidrogel y su síntesis

Los geles son un material cuya forma aparenta ser sólida, pero su densidad se asemeja a un líquido: tiene una apariencia gelatinosa. Está hecho a partir de redes de polímeros que se entrelazan y se sumergen en el interior de un líquido. Estos polímeros, permiten que el líquido mantenga una estructura rígida de forma y volumen constante, mientras que el líquido permite la unión de estos polímeros sin que estos rompan sus lazos. Cuando el líquido contiene agua, se le denomina hidrogel.

Existe una gran variedad de polímeros divididos principalmente en dos categorías: los sintéticos (creados en laboratorios) y los naturales, que se puede encontrar en el cuerpo humano, por ejemplo, en las córneas del ojo o en algunas uniones óseas.

El término hidrogel no fue acuñado hasta finales del siglo XIX, pero fue en la década de los 50 del siglo pasado cuando Wichterle y Lim ^[5] realizaron el primer preparado sintético a partir de metacrilato de 2-hidroxietilo (HEMA) con el propósito de crear lentes de contacto. Inicialmente, el hidrogel sintético se desarrolló con la intención de cubrir necesidades para aplicaciones de oftalmología, pero más tarde se introdujo en nuevas vías de aplicación biomédicas (liberación de fármacos), material médico (vendajes), productos comerciales (toallas sanitarias), aplicaciones agrícolas. No obstante, también se mantuvo en la línea de la investigación para la fabricación de nuevos biomateriales, el estudio de sus propiedades ^[6] y nuevas síntesis ^[7], además de utilizarse para el desarrollo de sistemas de sensado de imágenes ^[8].

El gran número de hidrogeles sintéticos que se han podido diseñar gracias a la vía de investigación científica, hacen que este tenga una larga serie de síntesis de fabricación ^{[9] [10]}. En este proyecto, para la realizar la síntesis de las gotas de hidrogel y llevar a cabo el anclaje de estas en chips (portas de vidrio).

2.3 Física de las lentes

Por la ley de Snell, se sabe que cuando un haz de luz incidente desde un medio 1 con un determinado índice de refracción llamado n_1 y un ángulo de incidencia θ_1 , atraviesa a un medio 2 con distinto índice de refracción n_2 , este se desvía en una dirección marcada por el ángulo de refracción θ_2 . Este fenómeno se traduce por la siguiente ecuación que lleva el nombre del autor de su descubrimiento:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 [1]$$

Se distinguen hasta 4 casos particulares:

- 1) En el primero de ellos, el ángulo $\theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$ y por lo tanto la incidencia se produce de manera perpendicular al plano limítrofe de los 2 medios. El haz refractado sigue en la misma dirección que el rayo incidente (aunque en algunos casos puede cambiar el sentido y ser reflejado) aunque también puede haber un reflejado de poca intensidad
- 2) Este segundo caso se produce cuando el haz refractado se desvía con una desviación de θ_2 que viene dado por la ecuación de la Ley de Snell. De acuerdo con la ecuación [1], depende de θ_1 y de la diferencia que existe entre los índices de refracción de los distintos medios.
- 3) El caso del ángulo crítico ocurre cuando el ángulo θ_1 es mayor o igual que un cierto ángulo que provoca que la luz no pueda refractarse, reflejándose totalmente en la frontera entre los distintos medios.
- 4) La última de las particularidades ocurre cuando no existe onda refractada en el medio 2, sino que toda la onda se ve reflejada de nuevo al medio 1. Este caso también se puede dar cuando $\theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$ para materiales altamente reflectantes, como por ejemplo el revestimiento metálico del vidrio del que están hechos la mayoría de los espejos.

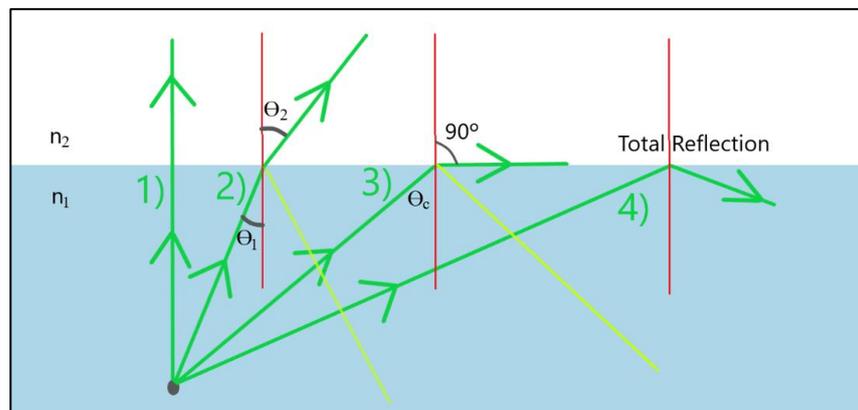


Figura 3: Ley de Snell con los 4 posibles casos, respectivamente (elaboración propia)

En lo ancho y grueso del proyecto se trabajó con la óptica del caso 2: tanto en las simulaciones, donde se hacía incidir un haz de luz estrecho sobre una de las curvaturas de la lente. La onda incidente era de menor tamaño que la lente de hidrogel para analizar su comportamiento sobre la curva y localizar el punto de enfoque en el centro de la cámara. En las simulaciones también se utilizó otro método en el que el ancho de haz era mucho mayor que el diámetro de la lente y por lo tanto se buscaba analizar el comportamiento del cono de luz producido tras atravesar la gota de hidrogel. Esto último nos resultó interesante para teorizar las pruebas de luz blanca que haríamos al final.

CAPÍTULO 3

Simuladores

RSoft es una herramienta de trabajo destinada a la ingeniería fotónica que se caracteriza por tener una potente y completa línea de softwares de simulación de alto nivel con optimizadores de diseño fotónico para uso científico e industrial. Fundamentalmente, sirve para el diseño de dispositivos y circuitos fotónicos, aunque también permite hacer diseño de redes y sistemas ópticos. A continuación, se muestran los simuladores con los que se trabajó en primera instancia para determinar cuál era el más propicio para el proyecto: *FemSim*, *BeamProp*, *FullWave* y *ModeProp*. A continuación, se detallan los más relevantes entre ellos.

3.1 FullWave

FullWave se basa en la técnica de Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo (FDTD, por sus siglas en inglés). Calcula el campo electromagnético en función del tiempo y el espacio en una estructura de índice dada en respuesta a una excitación electromagnética conocida. Este simulador es útil para estudiar la propagación de la luz en una amplia variedad de estructuras fotónicas, lo cual lo convierte en un buen candidato para nuestro proyecto.

En este simulador, se fue un poco más allá que en los anteriores. Inicialmente, se creó una figura de diseño real, donde se mostraba una semiesfera depositada sobre una lámina. La simulación tendría lugar en espacio libre, con un índice de refracción igual a 1, mientras que la semiesfera sería la gota de agua y la lámina Óxido de Silicio (SiO_2), con índices de refracción de 1.33 y 1.44, respectivamente. A continuación, se colocaba una fuente de excitación con longitud de onda de 1.55 nm sobre la parte superior, con cierta inclinación, y se iniciaba la simulación. Con esta simulación se cumpliría el primero de los hitos marcados, el de observar cómo se desviaba un haz de luz estrecho propagándose en espacio libre, al atravesar una superficie curva de otro material.

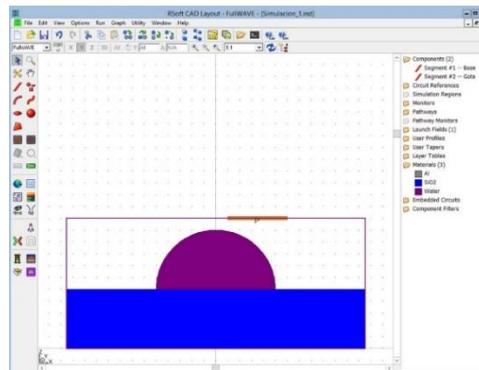


Figura 4: Primer diseño de simulación en FullWave

El hecho de utilizar una longitud de onda en el IR y utilizar la tercera ventana óptica era tan solo a modo de primera toma de contacto con el programa. Las medidas experimentales se hicieron con longitudes de onda de 530 y 660 nm. Como este diseño simplemente mostraba en una fase preliminar el comportamiento del haz de luz, se estuvieron probando y variando algunos parámetros de simulación. Por ejemplo, se varió el ancho de la fuente de excitación (en μm) que se muestra en la simulación de la siguiente Figura 5. El ángulo de inclinación de la fuente de luz se sitúa en torno a 45° .

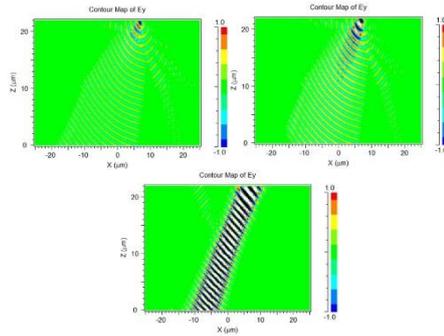


Figura 5: Resultados de simulación variando el ancho de la fuente de excitación para 0.5, 1 y 5 μm , izquierda, derecha y abajo, respectivamente

Los resultados de la simulación muestran que, a mayor ancho de la fuente, más colimado es el rayo de luz, muestra menos reflexiones y posee mayor directividad. Pero lo importante fue, que por lo que se estuvo viendo, parecía ser un simulador que se ajustaba a nuestro proyecto ya que permite visualizar el recorrido de una onda en espacio libre y su comportamiento al atravesar distintos materiales, lo cual resultaba más interesante todavía. Otro ejemplo de parámetro de variación, fueron los diferentes tipos de onda (todas en condiciones similares): Gaussiana, Rectangular, Multimodo y SlabMode, respectivamente que se muestran a continuación.

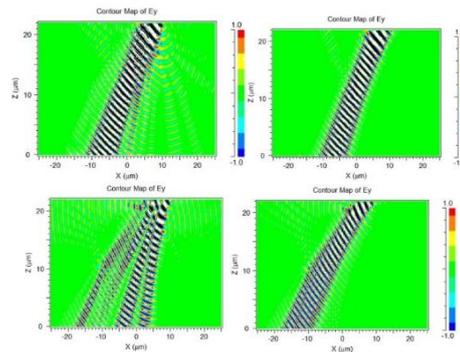


Figura 6: Resultados de simulación variando el tipo de onda de excitación para Gaussiana, Rectangular, Multimodo y SlabMode, (izquierda a derecha, arriba abajo, respectivamente)

Aunque de todos estos tipos de onda, la Gaussiana es en la que nos íbamos a centrar, se hicieron diferentes simulaciones con la mayoría de los parámetros con el fin de testear al máximo el simulador y familiarizarse con el programa. Aquí solamente aparecen algunos a modo de ejemplo. A continuación, se realizó un modelo más parecido al que íbamos a tener en el laboratorio tras haber realizado una serie de consideraciones y mejoras de las condiciones para la caracterización de la lente de hidrogel.

Para el resto de las simulaciones, se ha aumentado este tamaño de haz de luz y se ha proyectado en perpendicular desde 4 puntos diferentes de la esfera de hidrogel para observar la desviación del haz una vez cambia del medio acuoso para entrar en el interior del hidrogel, tal y como se muestra a continuación.

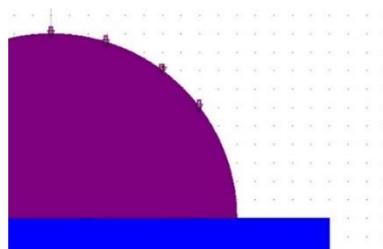


Figura 7: Semiesfera de hidrogel con los 4 puntos incidentes desde donde se ha simulado

Así, dependiendo del punto de la esfera, el ángulo observado ha sido diferente. Mediante una herramienta online de medición de ángulos, se ha podido determinar una aproximación precisa de estos ángulos. Se muestran los resultados en la siguiente Figura 10.

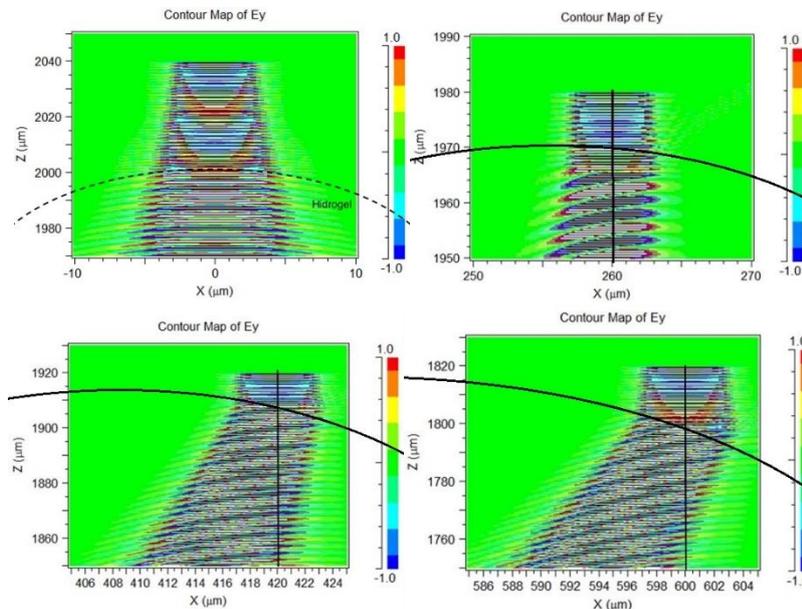


Figura 8: Directividad de haces de luz incidiendo perpendicularmente sobre la semiesfera de hidrogel desde distintos ángulos: 0° , 5° , 21° y 30°

Esto nos permite observar que existe una desviación visible de la luz cuando penetra en un medio de diferente índice de reflexión, en el interior del hidrogel y que, el ángulo de incidencia varía según la posición de la semiesfera sobre la cual se está incidiendo, no solo por índice de refracción, pero también por la curvatura de dicho punto de la esfera. A continuación, se muestra el índice de refracción del agua, dióxido de silicio y del PMMA utilizadas para estas simulaciones.

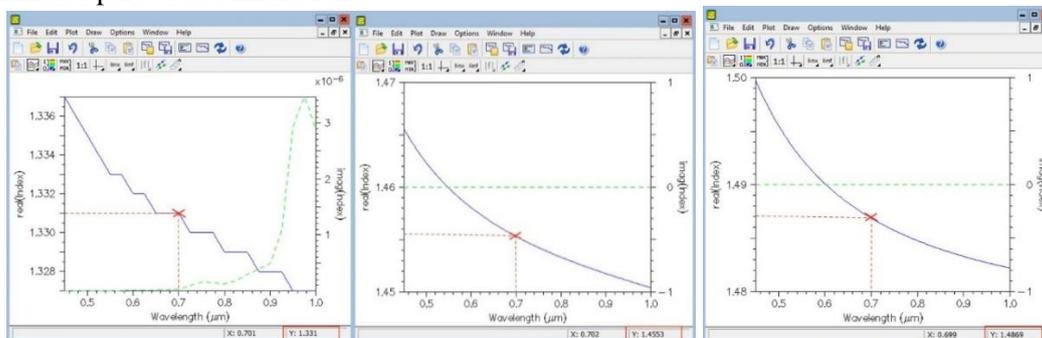


Figura 9: Índices de refracción del Agua ($n=1.33$), Dióxido de silicio ($n=1.45$) y PMMA ($n=1.48$), respectivamente

3.2 BeamProp

A diferencia de FullWave, que tiene un coste computacional elevado y que puede elevar los tiempos de simulación a días, BeamProp se basa en el método de técnicas avanzadas de propagación del haz en diferencias finitas (BPM, por sus siglas en inglés) que permite realizar simulaciones de figuras de mayor tamaño. Este simulador es funcional para el diseño y modelado de dispositivos fotónicos y circuitos integrados fotónicos. Aunque BeamProp limita en cierta manera la fuente de excitación ya que no permite modificarla a lo largo del eje Z, se ha invertido el sentido de simulación, que no altera en absoluto nuestros resultados, pero muestra los resultados en sentido contrario al convencional. En línea con lo que se venía haciendo anteriormente en FullWave, en las simulaciones de BeamProp también se han variado ciertos parámetros con el fin de

caracterizar la propagación de la luz. El ancho del haz, el radio de la gota de hidrogel y algunos índices de reflexión.

3.2.1 Variaciones del ancho de fuente de excitación

En esta siguiente parte, vimos cual era el efecto de variar el tamaño del haz proyectado y quisimos caracterizar cuanto afectaba al punto de convergencia.

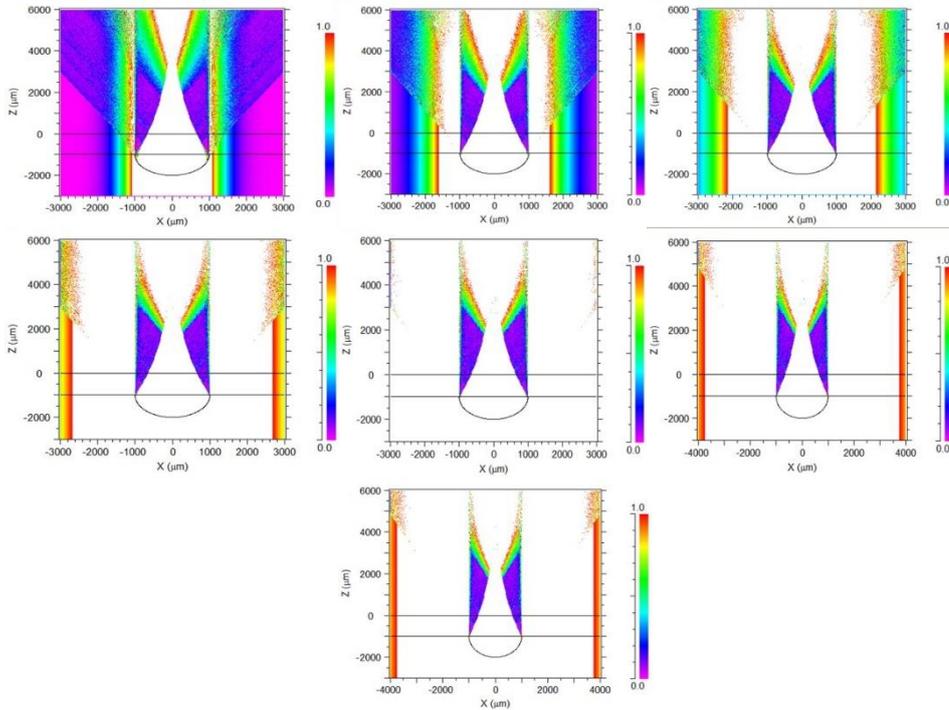


Figura 10: Simulaciones variando el Launch Width: a) 2 mm, b) 3 mm, c) 4 mm, d) 5 mm, e) 6 mm, f) 7 mm, g) 8 mm

Pasando los resultados a una tabla, y posteriormente obteniendo una gráfica, se tuvo:

Launch Width (μm)	Anchura del cono (μm)	Convergencia en plano Z (μm)
2000	220	3440
3000	320	2700
4000	360	2400
5000	400	2360
6000	400	2260
7000	400	2240
8000	400	2210

Tabla 1: Tabla y gráfica de resultados de los estrechos formados en el interior del cono y sus puntos de convergencia en el eje Z en función del Launch Width

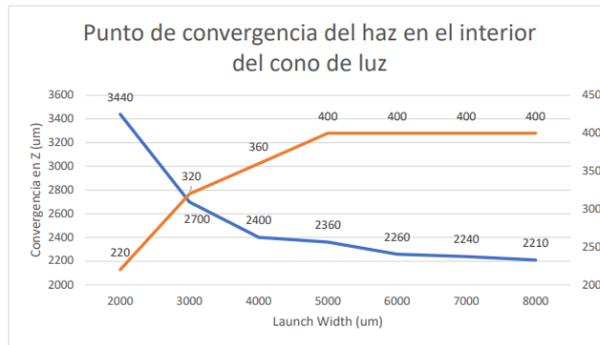


Figura 11: Gráfica de resultados de las simulaciones variando el Launch Width

Como se puede observar en la figura anterior, el punto de convergencia en el eje Z es más próximo a la fuente de excitación, a medida que se aumenta el tamaño de esta. Sin embargo, la distancia generada en el punto más estrecho de nuestro cono interior crece para valores próximos al radio de la gota, pero resulta ser insignificante a partir de cierto valor grande de anchura del haz. Esta simulación se hizo en base a que, al principio, no sabíamos con qué láser íbamos a medir y por lo tanto no conocíamos su ancho de haz, y también desconocíamos de que tamaño serían nuestras gotas de hidrogel.

3.2.2 Variaciones del diámetro de la gota de hidrogel

En este apartado, se ha simulado con diferentes tamaños de gota para caracterizar los resultados. Se han realizado hasta 3 simulaciones, en las que el radio de la gota de agua era de, 1, 2 y 3 mm, respectivamente. El ancho de haz se ha variado para cada simulación, siendo el doble del diámetro utilizado para cada caso, de manera en que la luz que penetraba las superficies saturaba y por lo tanto se podía apreciar mejor el cono de luz del interior.

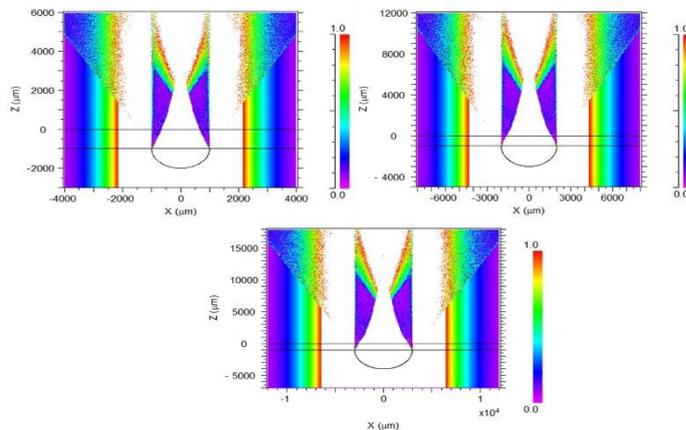


Figura 12: Simulaciones variando el tamaño de la gota: a) radio= 1000 µm, b) radio=2000 µm, c) radio= 3000 µm

A simple vista, se puede observar que a medida que se ha aumentado el radio de la gota de hidrogel, el punto donde converge su cono de luz, se ha ido alejando. En la Figura 12 a), el valor de este punto de convergencia estaba en 2440 µm, mientras que en las Figuras 12 b) y c), se sitúa en torno al 5450 y 8400 µm aproximadamente. No obstante, habría que calcular las relaciones encontradas para poder obtener una conclusión.

La relación que guardan estas distancias respecto al diámetro de la gota es de:

$$a) \frac{2440}{1000} = 2.44 \quad b) \frac{5450}{2000} = 2.725 \quad c) \frac{8400}{3000} = 2.8$$

Lo que determina que esta relación crece ligeramente a medida que aumenta el diámetro de la gota. Y en cuanto a la anchura del cono de luz que se forma, por la figura anterior se extraen los siguientes valores, y la relación es:

$$a) \frac{180 \times 2}{1000} = 0.36 \quad b) \frac{350 \times 2}{2000} = 0.35 \quad c) \frac{350 \times 2}{3000} = 0.233$$

Esta relación disminuye a medida que aumentamos los diámetros de la gota. Lo que se puede traducir, de ambos resultados, que a medida que utilizamos una gota de hidrogel de mayor diámetro, el punto focal será menor y estará más alejado.

3.2.3 Variaciones del material de la lente de hidrogel

En esta sección, se va a variar el índice de refracción de la gota de hidrogel cambiando el compuesto del que está formado, para caracterizar sus efectos. Actualmente, se ha simulado utilizando un material común en las lentes de hidrogel, el polimetilmetacrilato (PMMA) cuyo índice de refracción es igual a 1.4868 para una longitud de onda de 700 nm. En las siguientes pruebas se utilizarán índices de refracción de 1.35, 1.40 y 1.45 para esta misma longitud de onda, simulando otros tipos de material para la elaboración de lentes de hidrogel, con objetivo de ver el resultado que obtendríamos al utilizar unos hidrogeles u otros.

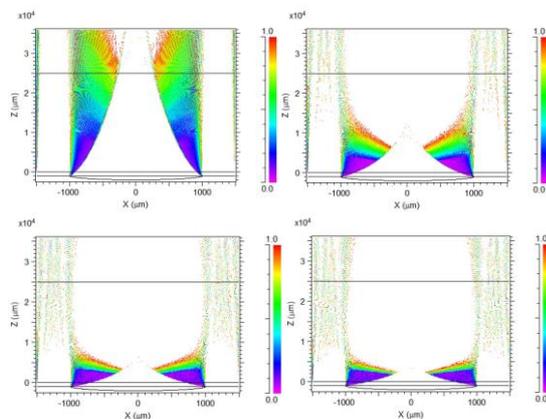


Figura 13: Simulaciones variando el índice de refracción: a) $n=1.35$, b) $n=1.40$, c) $n=1.45$, d) $n=1.4846$ (PMMA)

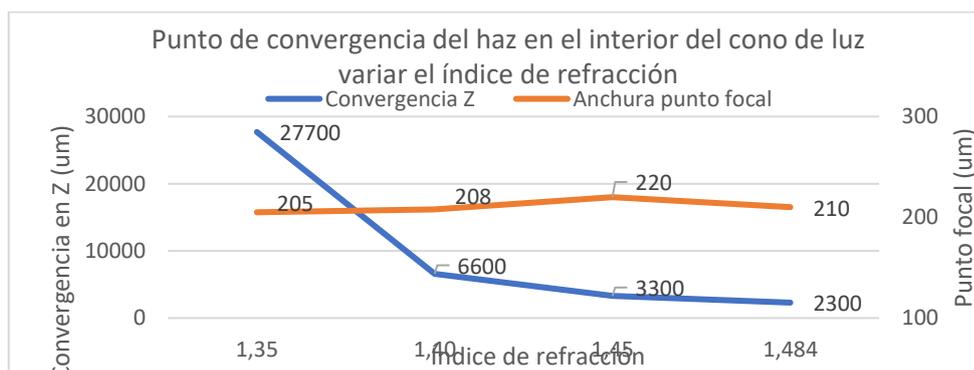


Figura 14: Gráfica de las simulaciones variando el índice de refracción

De la Figura 13 y 14, se puede observar que la anchura del cono de luz formado tras atravesar la gota depende principalmente del índice de refracción de la gota de hidrogel, ya que la variación es leve y casi constante. Se puede apreciar que este punto focal es siempre de un valor de 200-220 μm de ancho. Por el contrario, se puede ver en la Figura 14 que la distancia a la que se produce la convergencia sí que varía más notablemente. A mayor similitud el índice de refracción del hidrogel con el del medio (agua, $n=1.33$), se crea menor efecto de lente y por lo tanto el punto de convergencia se aleja.

CAPÍTULO 4

Diseños de montajes experimentales

Durante el transcurso del proyecto, se tuvieron diferentes montajes experimentales. El primero de ellos, para una fase muy poco avanzada, era básicamente para caracterizar el punto de luz sobre papel milimétrico, al traspasar una gota de agua desionizada, de agua con colorante, de etilenglicol o de PMMA. En este capítulo, presentamos algunos de los elementos fundamentales del montaje y, posteriormente, se muestran montajes realizados durante las pruebas.

4.1 Cámara

La cámara con la que se han estado haciendo medidas, tomando fotografías y capturando imágenes en tiempo real, ha sido de la familia “ace Basler”, modelo “acA640-120um” con detector CCD. Esta cámara monocromática, cuenta con una resolución de 659 x 494 píxeles y dispara hasta 120 fotogramas por segundo. Con un formato de video de 12 bits/píxel y un rango de tiempo de exposición de 4 μ s hasta 16.4 ms, se convirtió en la candidata óptima para realizar las medidas del proyecto. Esta cámara solamente es compatible con equipos que dispongan de puertos USB 3.0 y que permitan una comunicación simultánea bidireccional.



Figura 15: Cámara ace Basler acA640-750um y su eficiencia cuántica vs longitud de onda

Además, esta cámara cuenta con un formato de imagen de 1/4", un área activa de 3.6 mm x 2.7 mm con una diagonal de 4.5 mm en el interior de su objetivo, recubiertos por una visera metálica y protegidas por una lámina de vidrio que permiten capturar el punto de luz y realizar una conversión fotoeléctrica digital que se muestra por software, en escala de grises, al tratarse de un detector monocromático.

En la anterior Figura 15, se muestra una curva de la eficiencia cuántica en relación con la longitud de onda en el visible e infrarrojo cercano. Lo que muestra que esta cámara, tanto para capturar la longitud de onda del primer láser rojo empleado a $\lambda=660$ nm como el segundo láser verde a $\lambda=560$ nm, la convertían en un buen instrumento de medida.

4.2 Fuentes de luz láser

En cuanto a las fuentes de luz láser, se utilizaron hasta 3 diferentes durante toda la fase del proyecto. Las primeras medidas se realizaron con el láser color rojo, de longitud de onda 660 nm, mostrado en las figuras anteriores. Su punto ideal de estabilidad para conseguir un buen balance de luz visible y mínimas alteraciones era cuando se alimentaba con 2.3 V y una corriente eléctrica de 40 mA.

En una segunda fase y por circunstancias del proyecto, se utilizó una fuente láser de luz verde cuya longitud de onda es de 534 nm. Aunque apenas se pudieron notar las diferencias entre este láser y el anterior, sí que obtenía lo que queríamos: un spot de luz concentrado en el interior de la cámara tras atravesar una lente de hidrogel. Por eso se decidió continuar con él. Esta fuente de luz láser se alimentaba a 3.31 V y una corriente eléctrica de 26 mA, era donde se encontraba su punto estable.

En una fase final del proyecto, se utilizó una fuente de luz de banda ancha para realizar algunos de los últimos experimentos. Una fuente de luz de banda ancha es una fuente de luz que conforma todos los colores del espectro visible y que, por lo tanto, se ve blanca.



Figura 16: Fuente de luz láser roja (izq) y verde (der)

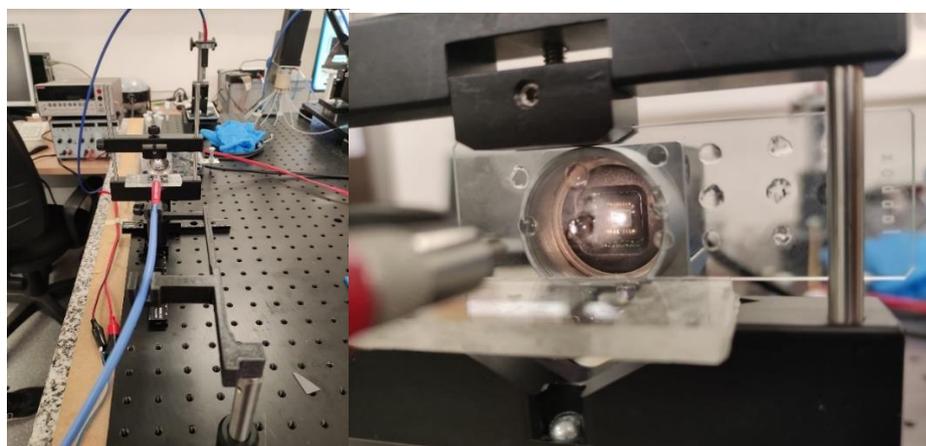


Figura 17: Fuente de luz blanca atravesando lente de hidrogel

4.3 Microlentes

Otro de los elementos a mencionar, son las microlentes empleadas, tanto en las fases de pruebas como en los montajes experimentales finales. Estas gotas iban depositadas sobre portaobjetos de vidrio y, durante el proyecto, se fueron utilizando de distintos materiales. Las primeras, se trataron de simples gotas de agua desionizada (DIW) o DIW con colorante rojo, a continuación, se utilizaron gotas de polimetilmetacrilato (PMMA).



Figura 18: Dos gotas de DIW de 4 mm de diámetro (color rojo y transparente) y dos gotas de PMMA depositadas sobre obleas de silicio

Estas, debido a su rápida volatilidad fueron sustituidas, por gotas de hidrogel D-1/2 BSA, D-TEA y M. Cuyas características químicas les permitía mantener su forma más sólida durante más tiempo, además de adherirse a superficies. Se depositaban en una placa de Petri con agua y se guardaban en una nevera a 4° C para evitar evaporaciones.

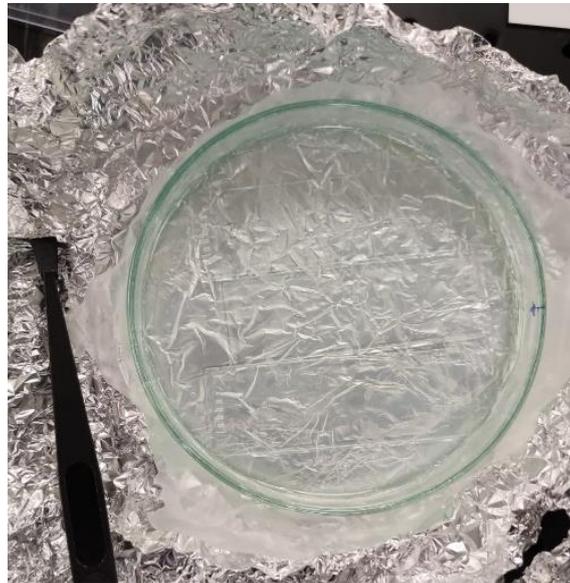


Figura 19: Placa Petri con las 3 láminas de hidrogel

4.4 Realización de las pruebas de sensado

Para llevar a cabo las pruebas las pruebas, se utilizaron diferentes componentes acuosos. Inicialmente, nuestro interés era ver como reaccionaba una gota de un hidrogel cualquiera al ser humedecida con una gota de agua desionizada (DIW). Más adelante, se depositaron gotas de Cloruro de Sodio (NaCl) y Cloruro de Calcio (CaCl₂) en distintas concentraciones con DIW sobre los hidrogeles, para caracterizar su resultado. El radio de curvatura de la lente variaba en función de estas concentraciones y del tipo de sal utilizado, produciendo desenfoques de luz.

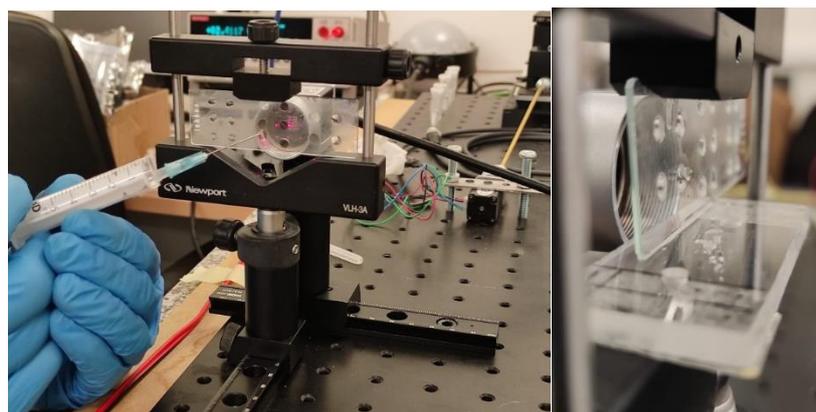


Figura 20: Deposito de un fluido determinado, con una jeringuilla, sobre la lámina de hidrogeles (izquierda), y líquido depositado sobre lente de hidrogel (derecha)

4.5 Diseño experimental inicial

Esta primera maqueta fue sin haber diseñado el software y antes de empezar a capturar con la cámara. A diferencia de nuestra prueba final que tenía una orientación diferente. En este diseño experimental inicial, lo que se buscaba era, tal y como se venía haciendo en las simulaciones, encontrar ese punto de enfoque al pasar el láser por una gota que hacía de lente. El láser rojo apuntaba en línea perpendicular a la mesa y estaba sujeto

mediante un brazo tipo grúa que lo mantenía estable, con una pieza de plástico como peana. Un microposicionador de dos ejes, se colocaba debajo, a la altura del láser. Este, tenía un papel milimetrado pegado sobre la plataforma del microposicionador, actuando como pantalla sobre la que incidía el haz láser que apuntaba a él de forma perpendicular. Por último, entre estos dos elementos (el brazo con el láser y la pieza de metal), se situaba un portaobjetos fijado mediante un imán de neodimio, pudiendo de este modo situar las lentes realizadas a partir de gotas líquidas en la posición deseada (Figura 21).

Lo positivo de la prueba fue que, se pudo colocar una microlente de hidrogel e incidir con un láser rojo para proyectar su spot producido sobre un papel blanco, a modo de pantalla. Con esto, pudimos ver las primeras variaciones del spot causadas los algunos movimientos simples: como el acercamiento/alejamiento de la microlente a la superficie de proyección. Esto nos permitió determinar la distancia óptima donde el spot de luz era lo más concentrado posible.

Lo negativo fue que este sistema permitía ver variaciones notables, pero no aquellas que serían invisibles a nuestro ojo, en una escala más pequeña. Por lo que, necesitábamos algo más sensible a estos cambios y más preciso que el ojo humano, por lo que se decidió colocar una cámara con sensores de luz remplazando la pantalla blanca. Se puede apreciar a continuación una clara perspectiva de la estructura mecánica para el montaje de este diseño preliminar.

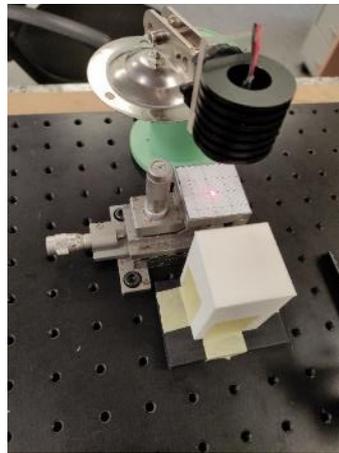


Figura 21: Diseño estructural del montaje experimental preliminar

4.6 Diseño experimental final

En una fase más avanzada del proyecto, se procedió a realizar el montaje de un diseño experimental que permitiría dar con los objetivos principales. Este montaje, se había diseñado con propósitos totalmente distintos e incluía nuevos elementos que lo diferenciaban de su versión anterior.

En primer lugar, se cambió la orientación de la configuración, esta vez, en lugar de medir en perpendicular a la mesa, se medía en paralelo. Esto fue posible gracias a que las microlentes de hidrogel estaban pegadas a la lámina de vidrio. La fuente de luz láser ya no apuntaba hacia abajo, sino que ahora se había extendido su “brazo” y mantenía la configuración horizontal. Un voltaje inferior a 2.5 V y una corriente de 0.17 mA, suministraban corriente eléctrica al láser desde la fuente de alimentación.

Al otro lado de la mesa, a unos 50 cm de distancias, se colocaba la cámara monocroma sobre un poste metálico anclado a una barra deslizante perpendicular. Manualmente, se alineaba con la fuente de luz láser de manera que el punto de luz entrase justo por el centro de la cámara y diese de lleno en los fotodiodos. Un ajuste de roscas y tornillos eran necesarios para mantener la estabilidad de este sistema.

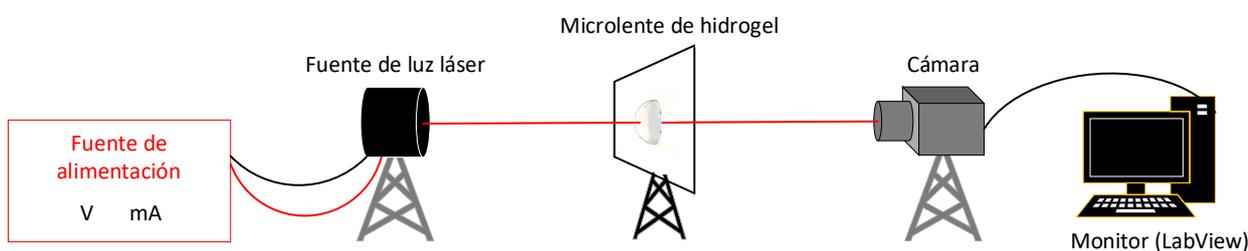


Figura 22: Esquema del montaje experimental final

A continuación, acorde a las simulaciones, se colocaba un soporte – porta muestras unos 3 cm delante de la cámara, que iba enganchado en otra barra deslizante, pero esta vez en el eje de dirección del haz. De manera que se pudiera alejar o acercar la cámara, manteniendo siempre la misma altura. En este soporte se colocaba la lámina con las gotas de hidrogel. Con lo que, si el spot no quedaba concentrado en el punto interior de la cámara, se mantenía el alineamiento del sistema y con acercar o alejar este soporte, era suficiente para encontrar el punto enfocado.

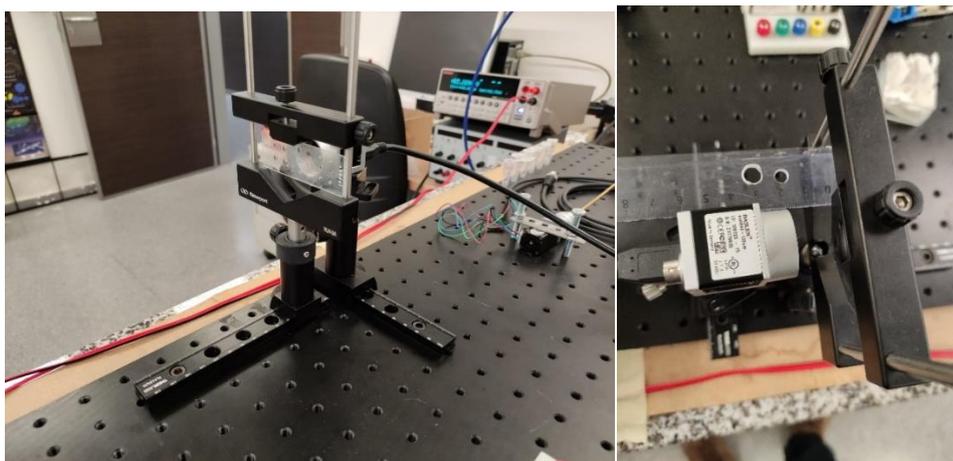


Figura 23: Estructuras deslizantes del soporte porta - muestras y de la cámara, y separación entre ellas

Desde el departamento de química de la UPV, nos proporcionaron microlentes de hidrogel de diferentes tamaños, de hasta 3 materiales diferentes: D-1/2-BSA, D-TEA y M, depositadas sobre 3 portaobjetos distintos. Cada uno contaba con 15 microlentes de diferentes diámetros; 1,2 y 3 mm. Se guardaban en una placa de Petri, donde iban bañadas en agua desionizada y, además, había que mantenerlas en un lugar seco y frío para conservarlas y evitar su deterioro, por lo que se guardaban en una nevera a 5° C cuando no estaban en uso. El

porta muestras antes mencionado, cuenta con un sistema mediante roscas que permite apretar la lámina depositada para mantenerla fija, estable y en perpendicular.

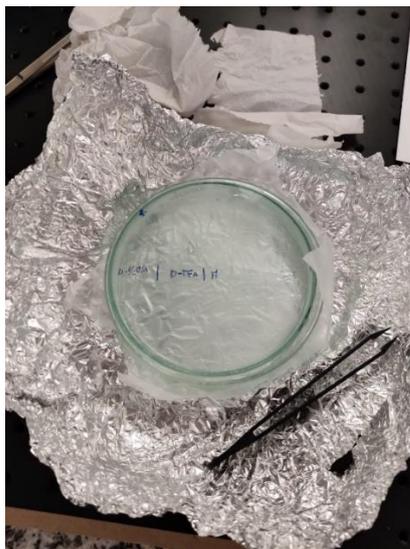


Figura 24: Placa de Petri con las 3 láminas de gotas de hidrogel contenidas en su interior: D-1/2-BSA, D-TEA y M

Una vez toda esta configuración estaba lista, se abría el programa de Pylon Basler, que encendía la cámara y comenzaba su captura de imágenes. Se desplazaba el porta – muestras con la lámina de las microlentes de hidrogel con el fin de visualizar la imagen más nítida y óptima posible. A continuación, se ejecutaba el programa diseñado en LabVIEW, que inmediatamente empezaba a registrar imágenes y valores. Tras unos minutos, se extraía con una jeringuilla, algunos de las disoluciones a sensor, formadas por agua desionizada, cloruro de sodio (NaCl) y cloruro de calcio (Ca₂Cl) en distintas concentraciones molares. Estos, eran depositados prudentemente gota a gota, sin tocar ningún elemento por temor a desalineaciones, y sin tapar el haz de luz del láser por no provocar sombras sobre la microlente de hidrogel. Para una de las microlentes de hidrogel (M) una de las características era la hidrofobicidad, que repele el agua, y por lo tanto no resultaba cómodo para trabajar. Y cuando se mezclaban estos elementos, lo hacían de manera violenta ya que se perdía por completo el spot de luz capturado durante cortos segundos, hasta que se recuperaba lentamente.

Este fue el modus operandi de la hidratación producida sobre la gota de hidrogel para todas las pruebas realizadas y detalladas en el siguiente capítulo.

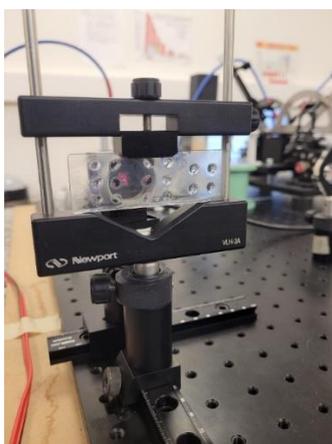


Figura 25: Punto concentrado de luz en el interior de la cámara tras la hidratación de las microlentes de hidrogel

CAPÍTULO 5

Software de control del setup de medida

5.1 Pylon Viewer Basler Software

Pylon Viewer Basler Software (Pylon Viewer) es el programa de la cámara Basler que permite al usuario, a través de una interfaz, visualizar la imagen a tiempo real capturada por la cámara, además de configurar algunos parámetros, capturar fotos, almacenarlas, etc. La cámara Basler, se conecta al equipo mediante un cable USB, pero únicamente a través de un puerto USB 3.0. Este puerto, es generalmente de color azul en los equipos Windows, y permite una transferencia bidireccional simultánea además de una comunicación de datos más rápida que la de un puerto normal. La velocidad de transferencia es de hasta 4,8 Gbit/s.

Esta herramienta software del fabricante, nos permite variar el tiempo de exposición de la imagen (con un mínimo de 4 μ s), la ganancia (en dB) y otros parámetros secundarios. Además de mostrarnos la imagen capturada por la cámara en tiempo real, junto con el número de imágenes tomadas, un pequeño histograma de los píxeles que conforman la imagen, etc. Como se puede ver en la siguiente figura, es un programa de tratamiento de imagen a nivel básico, con una interfaz simple en la que se pueden realizar ajustes muy superficiales. Óptimo para comenzar.

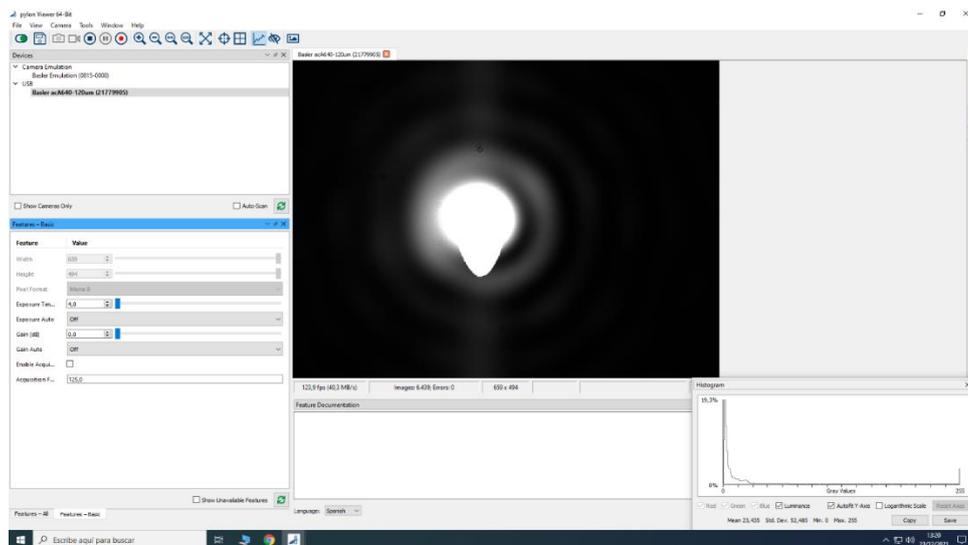


Figura 26: Interfaz de Pylon Viewer capturando el spot de luz del láser, cuando incide de forma directa

Por ello, para el tratamiento los datos recogidos no se utilizó Pylon Viewer, pero sí para comprobar el correcto funcionamiento de la cámara y calibrar la imagen en los pasos iniciales. Por lo general, antes de cada prueba, se comprobaba en este programa que la imagen capturada estaba centrada y se ajustaban los parámetros de exposición y ganancia para ver si era posible obtener una imagen nítida con las condiciones dadas.

Pylon Viewer requiere de instalación de drivers en su primera configuración, y esto provoca conflicto con los drivers de LabView, que se solapan mutuamente y se impedirá la ejecución simultánea con LabView. Por ello, es recomendable tenerlo instalado en otro equipo, para evitar problemas de compatibilidad en los drivers, activar y desactivar manualmente los drivers de cada programa; lo cual no es una opción muy rápida (si es que el usuario sabe hacerlo).

5.2 LabVIEW

Uno de los hitos principales a cumplir de este trabajo era, no solo caracterizar los resultados de las pruebas, sino también crear un diseño por software de una interfaz que permitiese al usuario visualizar, controlar y registrar los datos obtenidos para posterior análisis. Para ello, se escogió hacerlo mediante la herramienta de software LabVIEW, ya que es ampliamente utilizada por ingenieros e investigadores y óptima para el diseño de aplicaciones que requieren pruebas, medidas y control. Esto permite, no solamente controlar y monitorear pruebas durante la fase del proyecto, pero también le sirve a un futuro usuario que decida seguir en la línea de investigación. Aunque no es de uso gratuito, la UPV tiene licencias para los alumnos e investigadores.

Como sabemos, LabVIEW se divide en 2 bloques principales: el diagrama de bloques que conforma el “código” del programa, y la interfaz de usuario, que permite el control del programa. Aunque el diagrama de bloques del programa aparece en el anexo, a continuación, se muestra y explica brevemente la interfaz usuario-máquina. Aunque es bastante intuitiva, aparecen nombres y títulos sobre los objetos del interfaz, y esta se divide principalmente en 2 partes divididas por las 2 pantallas que aparecen: la de vídeo, que muestra la imagen capturada por la cámara en tiempo real, y la de imagen, que muestra la última foto capturada por el usuario.

La parte de video representa la que está en el perfil izquierdo de la pantalla y se va refrescando continuamente. Es la primera imagen visible cuando se corre el programa y muestran los fotogramas que conforman el vídeo. Justo debajo, podemos ver un histograma que señala la cantidad de pixeles en los valores de la escala de grises (0 a 255). Junto a este, aparecen algunas estadísticas básicas, así como porcentajes de los distintos pixeles que conforman la imagen, en la escala de grises.

En la parte central del interfaz, tenemos unos parámetros de configuración de la toma de video donde el usuario puede variarlos para obtener una imagen lo más nítida y óptima posible. Además, en la parte superior aparece un botón rojo de parar el video y un botón verde en la parte central, para tomar una captura.

En el perfil derecho del interfaz, aparece la última imagen tomada por el usuario. Las mismas estadísticas que se tienen en el vídeo aparecen justo debajo, y le permiten al usuario utilizarlas como referencia compararlas con las del video de tiempo real y poder ver una posible evolución.

En la siguiente Figura 27, en la imagen de la derecha se observa la última captura realizada, mientras que la imagen de la izquierda está continuamente mostrando la imagen capturada a tiempo real (vídeo). En esta misma figura, la pantalla de captura de la imagen muestra el spot de láser cuando se incide directamente en el interior de la cámara, que es un spot más ancho y tiene mejor definición. Mientras que, en la imagen de la izquierda que corresponde con el vídeo, se puede notar que el spot no es tan claro ni está bien definido, porque se ha colocado una de las microlentes a modo de filtro, que es causante de esta deformación del haz de láser.

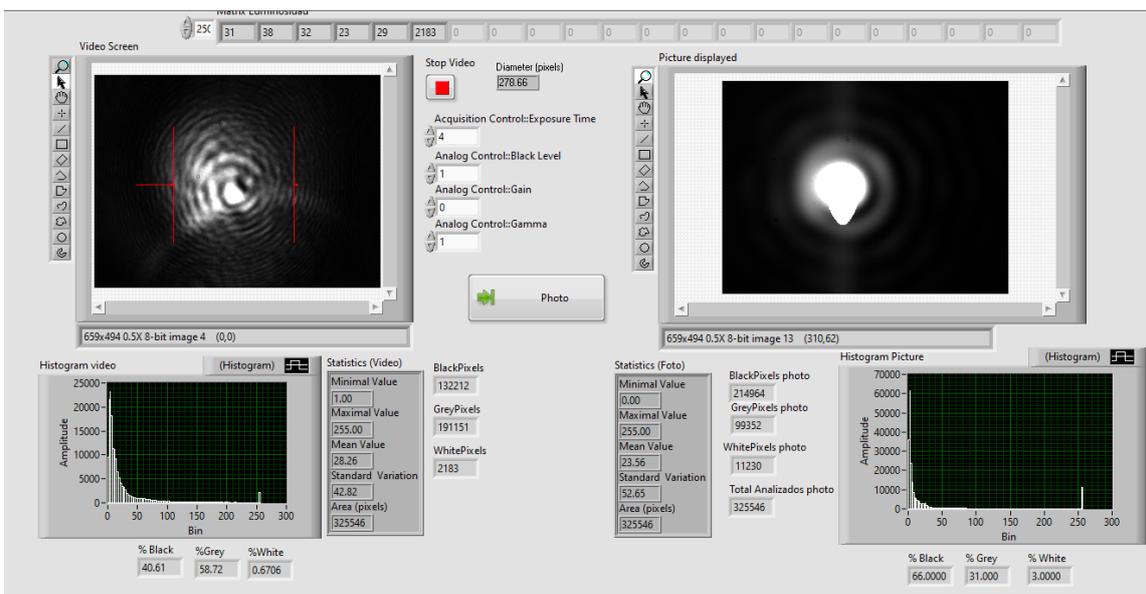


Figura 27: Interfaz usuario máquina del programa diseñado en LabVIEW

CAPÍTULO 6

Pruebas realizadas con láser rojo ($\lambda=660$ nm)

En este capítulo, se muestran con imágenes las primeras pruebas experimentales realizadas con láser roja y se explican los resultados junto con aportación de gráficas e imágenes tomadas por la cámara. Inicialmente, se introducen pruebas de estabilidad del láser para caracterizar su fiabilidad. A continuación, se realizan primeras pruebas con lentes ópticas cuyas focales son de pocos milímetros o pertenecen a un cabezal de DVD. Después, se llevan a cabo las medidas experimentales en las microlentes fabricadas (se detalla este proceso) y las distintas deposiciones de líquidos. Y, por último, se presentan algunas de las mejoras del programa propuestas, así como por qué se intentaron llevar a cabo de tal manera o no.

Antes de sumergirse en las pruebas, sería conveniente recordar la Figura 3: Ley de Snell y los 4 posibles casos, para entender de manera más cualitativa la física que se produce en los experimentos.

En el primer caso, se modeló de manera que produjese una refracción desviada como en el caso 2, ya que no se incidió directamente sobre una superficie plana límite entre 2 medios diferentes, sino que se hizo sobre la curvatura semiesférica de la gota de hidrogel. Esto provocaba una desviación refractada del rayo de luz láser utilizado. A nivel de simulación resultó ser interesante, ya que se pudo ver hasta que distancia se podía colocar el fotosensor tras la lente de hidrogel sin que la desviación lo apartara totalmente. En cuanto a nivel experimental, en calibración y alineamiento del sistema, se observó que la curvatura de gota de hidrogel desviaba la luz y desplazaba lateralmente el spot marcado en el interior de la cámara en sentido opuesto a la dirección que incidía el láser. Es decir, si se desplazaba ligeramente hacia la izquierda (el haz de luz láser), la incidencia ocurría en la parte izquierda de la gota de hidrogel, y los rayos tendían a refractarse hacia la derecha en la cámara: el spot de luz del interior de la cámara se veía ligeramente desplazado hacia la derecha. Y viceversa. Además, durante las pruebas experimentales, esto también se veía reflejado en el video capturado por la cámara y se podía apreciar en la pantalla del ordenador el ligero desplazamiento de esta concentración de luz.

En la Figura 28, se puede observar este fenómeno comentado anteriormente, donde aparecen todos los elementos del montaje experimental en un esquema en el que no se ha respetado la escala, con el objetivo de visualizar mejor los detalles ocurridos. En ella, se observa la desviación producida en el haz de luz marcada inicialmente por la curvatura de la esfera de hidrogel y por atravesar los distintos medios: aire, hidrogel, metacrilato y de nuevo aire. Además, también se puede observar que este efecto producido en exceso provocaba lo ya mencionado anteriormente, que la suma de los ángulos del rayo de luz provocase la total desviación y que la cámara no pudiera recoger ninguna información.

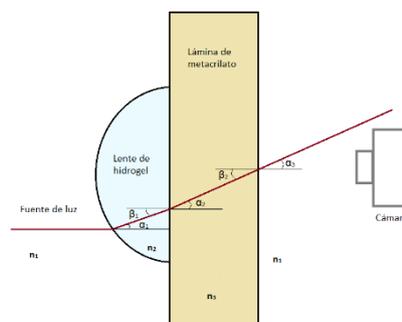


Figura 28: Camino seguido por el haz de luz al incidir sobre la lente de hidrogel depositada sobre lámina de vidrio

Y en la Figura 29, se puede observar el efecto buscado en las simulaciones, en el que una fuente ancha de luz incide sobre la lente de hidrogel de mismo diámetro y provoca un cono de luz cuyo punto de enfoque se buscaba caracterizar. Con esta idea se venía buscando el punto de enfoque para alinearlo con la cámara y recoger la variación producida. Como finalmente no se estuvo trabajando con fuentes de láser anchas sino estrechas, nos sirvió para saber buscar el punto de enfoque y recogerlo con la cámara con el objetivo de obtener la medida más precisa posible. Y esto va en línea con los objetivos del proyecto, que se basan en la expansión producida al aplicar un líquido sobre la lente de hidrogel, dando lugar a una variación de curvatura y de diámetro. Este efecto es el responsable de la variación de la posición del punto de enfoque, que es caracterizado por la cámara.

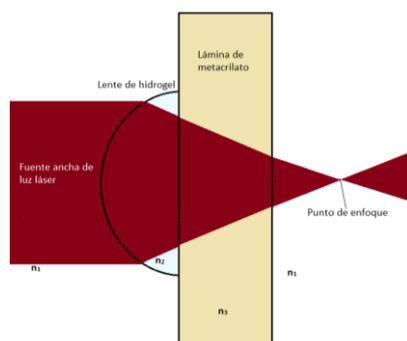


Figura 29: Incidencia con fuente ancha sobre la curvatura de lente de hidrogel para hallar el punto de enfoque

6.1 Pruebas de estabilidad fuente de láser rojo

Tras la alineación del setup y en ausencia de lentes ópticas, para esta primera prueba se realizó la incidencia del spot de luz en el detector de la cámara. El objetivo era caracterizar la estabilidad de la fuente y ver cuanto margen de error nos podría introducir en las medidas posteriores. Tras 3 minutos de prueba, se trataron los datos de la prueba y se observó que, la fuente tendía a oscilar ligeramente de manera progresiva. La prueba empezó en 44.3 unidades de medida de valor promediado y terminó en 44.45 unidades, una diferencia apenas diferenciable. Pero gracias a una línea de tendencia trazada sobre los resultados de la gráfica, se puede observar en la Figura 30, que existe un aumento de 0.2 unidades, con lo que este fue nuestro valor de margen de error que podía introducir la fuente de luz láser rojo cuando se alimentaba con la fuente de alimentación Keithley 2400, una fuente súper estable.

Prueba de estabilidad 1 luz láser rojo con Keithley

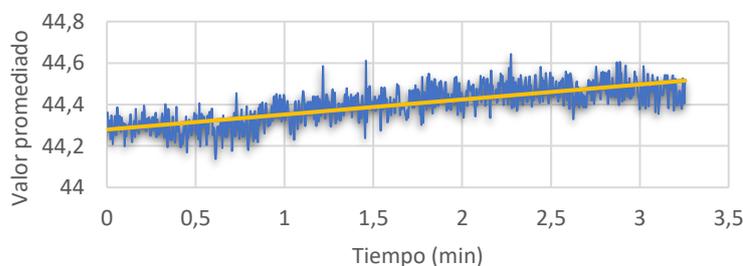


Figura 30: Prueba de estabilidad del láser rojo

A continuación, se repitió la misma prueba durante 13 minutos. El objetivo era repetir la prueba para corroborar los resultados anteriores, además de analizar si estas ligeras alteraciones se veían reflejadas de igual

manera en una prueba de mayor duración. De nuevo se colocó el haz de luz láser rojo apuntando de manera directa sobre la cámara y, al tratarse los resultados se obtuvo la Figura 30. Con ayuda de una línea de la media móvil sobre 20 muestras anteriores, se observa que la fuente es algo inestable durante los primeros 4 minutos, pero a continuación retoma un patrón muy similar al anterior. El valor inicial de la prueba es de 41.15 AU inicialmente y 44.35 AU al finalizar. A pesar de que se encontraron más picos irregulares en esta prueba que en la anterior, se puede seguir observando que las fluctuaciones, en ausencia de picos irregulares, sigue siendo de 0.2 unidades.

6.2 Medidas con la lente de un cabezal de DVD

En esta segunda prueba con lentes, se cambió la lente anterior por una de menor distancia focal extraída de un cabezal de DVD. El objetivo era intentar detectar cambios menores. Esta vez, y a diferencia de la prueba anterior, los cambios no son visibles a simple vista, pero sí que lo son para los datos recogidos por el programa. Para esta prueba, se alineó la nueva lente con el haz del láser y el objetivo de la cámara. Se colocó esta lente a una distancia donde los rayos convergían de manera lo más concentrada posible sobre el sensor de la cámara. Tras preparar el programa y comenzar la prueba, el número de píxeles blancos (valor 255) recogidos en la imagen eran de 35 345 de los 325 546 que conforman la imagen y con una media de 53.97 unidades en la escala de grises.

A continuación, se desplazó la lente 1 mm hacia la cámara, y la media anterior subió a 56.91. Por lo que, se tenía una variación mínima, pero apreciable. La media del valor conjunto de todos los píxeles de la imagen aumentó al acercar la lente a la cámara de 1 mm. Teníamos una diferencia de 3 unidades, Figura 31 (izquierda).

Por último, se tomó una segunda foto tras desplazar 0.5 mm la lente en dirección opuesta. Se observó que el valor de la media de píxeles en la escala de grises de la imagen había pasado de 57.20 unidades iniciales a 57.72 unidades finales, Figura 31 (derecha). Algo inapreciable a simple vista en la imagen, pero que gracias a los datos recogidos se podía distinguir una leve diferencia.

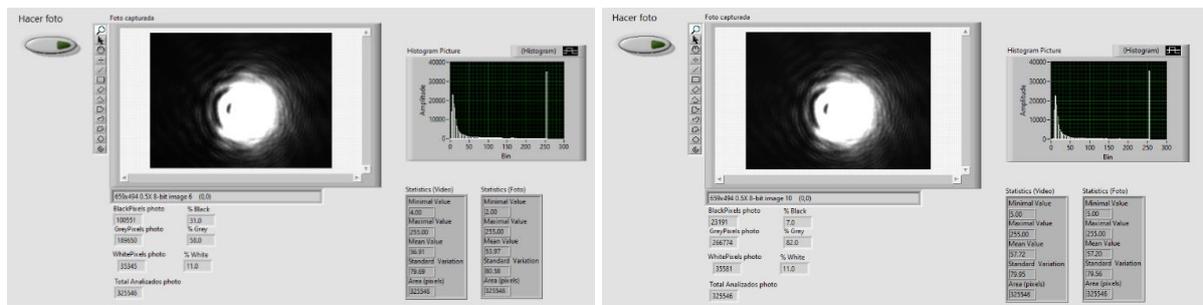


Figura 31: Captura de pantalla del programa cuando se alejó el cabezal de DVD 1 mm con respecto a la cámara (izquierda) y después cuando se acercó 0.5 mm (derecha)

De la anterior figura, se puede observar que existe un bloque llamado “Statistics (Foto)” donde aparecen los valores de la foto tomada en el estado inicial, y se tienen que comparar con los de “Statistics (Video)”, el estado final.

Tras observar la ligera variación que se había producido durante esta prueba, se concluyó lo siguiente: el programa de LabView era capaz de detectar minúsculos cambios de píxeles sobre la imagen incluso cuando no eran apreciables por el usuario, y que además no entraban en conflicto con el margen de error que podrían los introducir los circuitos del montaje. Lo que podría resultar interesante para visualizar resultados de pruebas con variaciones mínimas.

6.3 Primeras medidas con lentes de hidrogel y con hidratación

Tras haber observado los buenos resultados en las pruebas con lentes de vidrio, decidimos empezar con las pruebas con las microlentes de hidrogel. Estas estaban depositadas sobre una lámina de vidrio que se fijaba en un portaobjetos que se colocaba de igual manera que las lentes de vidrio: entre la fuente de luz láser y la cámara. El objetivo era observar el comportamiento de la microlente (convergente) de hidrogel tras aplicarle algunas de las disoluciones a sensar.

A continuación, se presentan algunas de las primeras pruebas que se realizaron. En las cuales, por todavía no estar familiarizado con el montaje experimental, ni alineamientos de los elementos, ni valores de los resultados, etc, el programa de LabView todavía no estaba diseñado para registrar los datos recogidos. Simplemente, lo que se hacía en estas pruebas iniciales, a base de repetirlas innumerables veces, era comprobar que toda la medida experimental junto con el depósito de la disolución a sensar era realizable. Esto nos sirvió para aprender y evitar cometer errores en las medidas posteriores. Es lo que correspondería con una fase 0 de pruebas con microlentes de hidrogel (Figura 32).

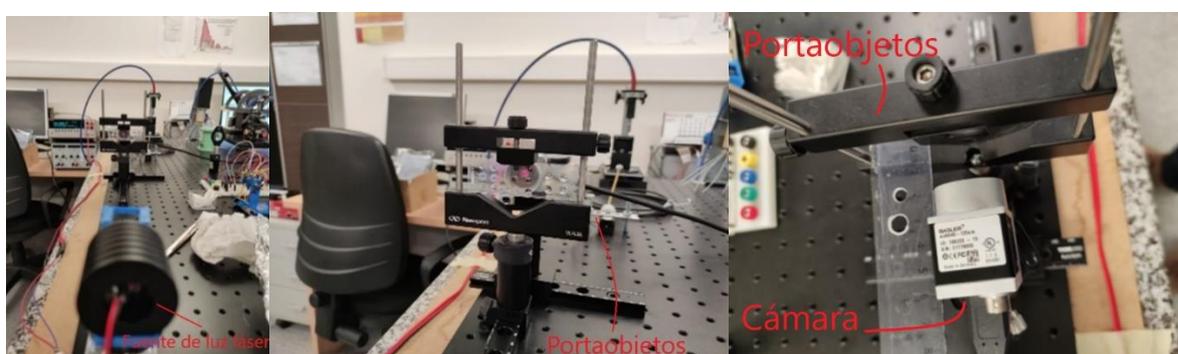


Figura 32: Configuración alineada del montaje con fuente de luz láser roja (arriba izquierda), con el spot en el interior de la cámara tras atravesar microlente (arriba derecha) y porta muestras separado a 2 cm del objetivo de la cámara (abajo)

En algunos casos, se utilizaba una pantalla opaca que se colocaba detrás del porta muestras con las lentes de hidrogel, con el objetivo de tener una primera idea visual sobre a qué distancia se concentraba el spot de luz al máximo (Figura 33). Tras esto, se desplazaba hasta colocarse a esa distancia de la cámara.

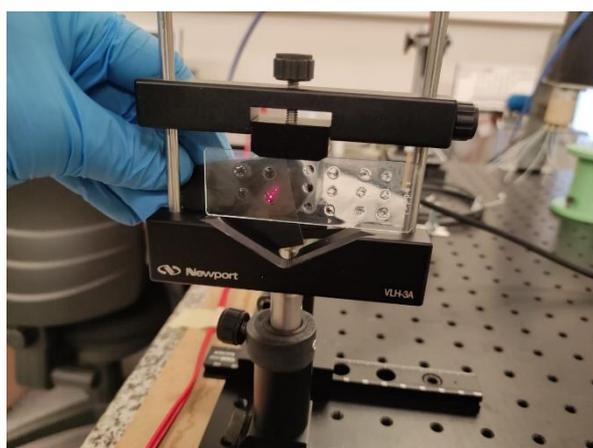


Figura 33: Punto de enfoque de luz roja al atravesar microlente de hidrogel M sobre una pantalla opaca

En una estas primeras pruebas, se colocó una gota de hidrogel D-1/2 BSA con luz láser rojo proyectada sobre él, se humedeció con DIW y se dejó observar unos minutos, Figura 34. Donde se pudo ver que, o bien las características adhesivas de la microlente sobre una componente vertical provocase su lento deslizamiento, o bien la deshidratación de la gota con el paso del tiempo provocaba un cambio de su forma semicircular.

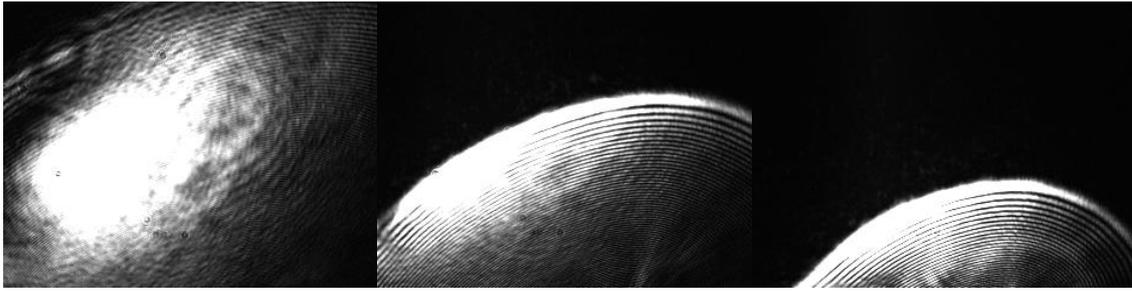


Figura 34: Spot de luz de microlente de hidrogel D-1/2 BSA con luz láser roja incidente (izquierda), tras 5 (centro) y tras 10 minutos (derecha)

Como se observa en los resultados, existe un cambio en la forma del spot y un desplazamiento producido. Tras una hora, se dejó la lámina con los hidrogeles fuera de su placa Petri y sin hidratación, se repitió esta prueba y se observó en un estado inicial, que el spot era completamente diferente al de la prueba anterior, ver en Figura 34 (izquierda). Esto, que al principio no teníamos explicación clara, con el avance del proyecto se vio que principalmente se debe a la deshidratación de la microlente. Al tratarse de un hidrogel, este tiende a evaporarse cuando no se encuentra cubierto de un líquido que lo hidrata y lo mantiene uniforme. Además, si tampoco se conserva a temperatura baja, la evaporación se acelera aún más.

A continuación, se muestra el nuevo spot obtenido de la misma gota de hidrogel D-1/2 BSA, donde su punto de convergencia se ha visto modificado con respecto a las imágenes anteriores, siendo las medidas las mismas.

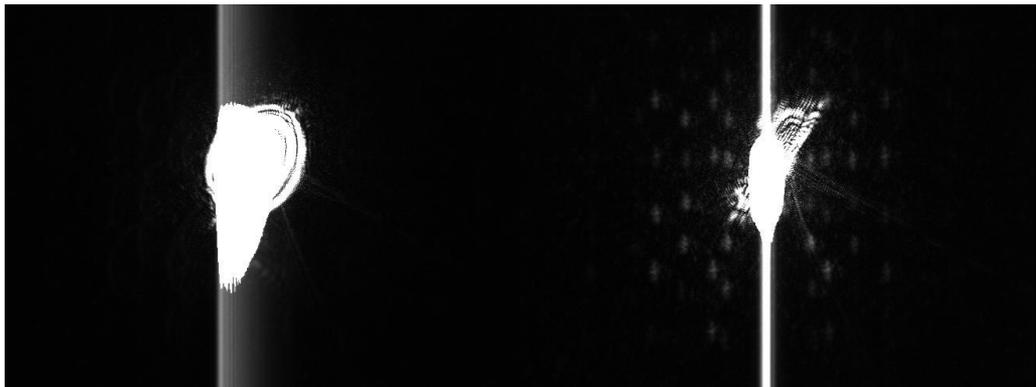


Figura 35: Spot de hidrogel D-1/2 BSA (izquierda) y tras hidratación con DIW (derecha)

En la Figura 35 (derecha) tras hidratación con DIW, el spot circular original se deforma, aparece un reflejo vertical más pronunciado y además se presenta un patrón de puntos nuevo. Esto son reflexiones múltiples presentes entre la lente y el portaobjetos, y entre el portaobjetos y el aire. La línea vertical central que aparece no es, sino que la saturación de la luz acentuada por la hidratación.

6.3.1 Medidas de D-1/2 BSA fluyendo agua desionizada y Cloruro de Sodio (NaCl)

En esta siguiente prueba, se utilizó hidrogel D-1/2 BSA, se situaron a una distancia de 5 cm de la cámara, ya que era la distancia a la que el spot se enfocaba con este hidrogel. Se alimentó el láser con una corriente eléctrica de 40 mA y una tensión de 2.3 V, se escogió el tiempo de exposición y la ganancia óptima para la medida, y se estuvo midiendo durante 50 minutos. Tras 13 minutos de medida tomando una línea base, se hidrató la lente de hidrogel mediante agua desionizada. Posteriormente, tras su secado y comprobando que el spot había recuperado su forma (y valor promediado en LabView) inicial, a los 30 minutos se procedió a depositar una gota de DIW con Cloruro de Sodio, con una concentración de 20 mg/ml.

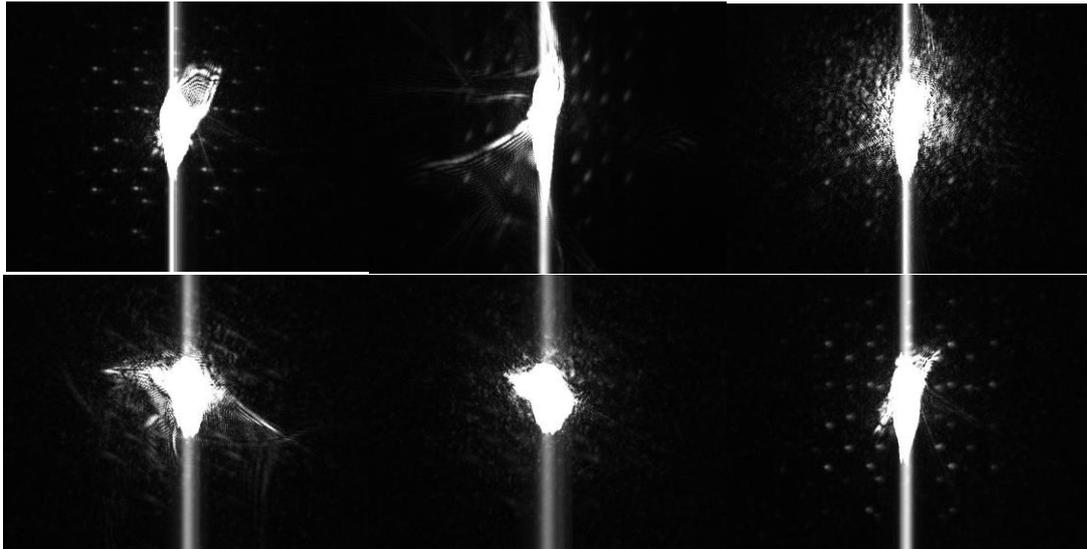


Figura 36: Spot de luz láser rojo formado cuando se ha hidratado DIW: estado inicial (1ª fila izquierda), reacciones, post reacción (2ª fila centro) y estado final (2ª fila derecha)

Como se puede comparar de la primera y última imagen de la Figura 36, el spot de luz retoma parcialmente su forma original. después de haber pasado por varias fases en la que el hidrogel reaccionaba con el líquido depositado. Se observa también que aparece un patrón simétrico de puntitos debido a las reflexiones internas que están ocurriendo. Estas reflexiones, se deben a un efecto producido por la hidratación ya que únicamente aparecen tras reacción. No obstante, aunque en el estado inicial ya aparecían, es porque la misma gota ha sido hidratada anteriormente y no ha pasado el suficiente tiempo como para terminar de deshidratarse. Que no es el mismo efecto que se produce cuando la gota se extrae de la placa de Petri y presenta otro tipo de hidratación, que simplemente desenfoca el spot de luz creado Figura 36 (izquierda). Ahora se caracterizaron y analizaron los posibles efectos producidos por las diferentes hidrataciones.

Siguiendo con nuestra prueba, viene la segunda hidratación: con Cloruro de Sodio a una concentración de 20 mg/ml. Las imágenes capturadas del spot reaccionando a esta hidratación se muestran en la Figura 37.

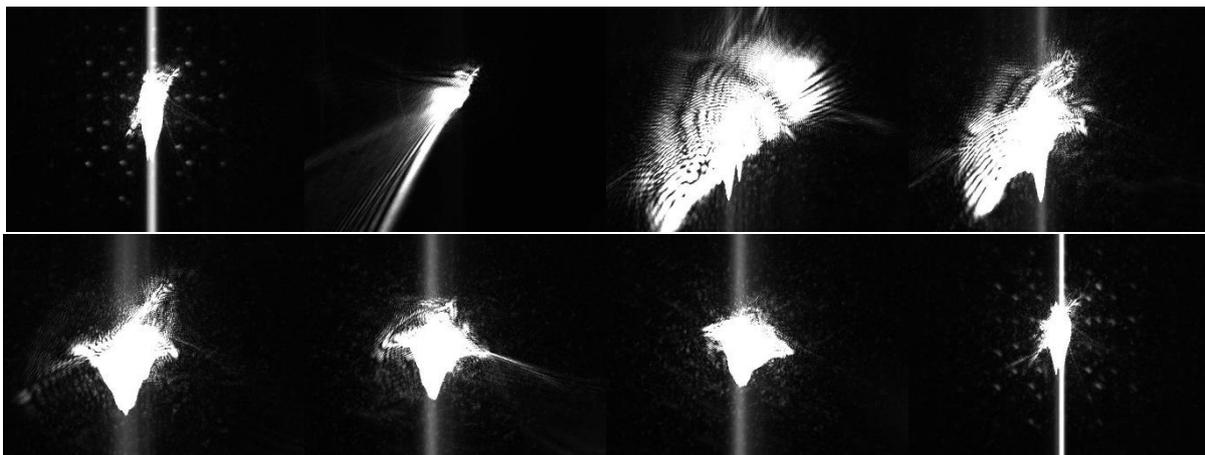


Figura 37: Spot de luz láser rojo formado cuando se ha hidratado una concentración de 20 mg/ml de NaCl: reacciones y estado final (2ª fila derecha)

Se observa que, al igual que en la hidratación anterior, el spot de luz sufre una deformación tras la hidratación. Aunque diferente, no solo por la forma, sino también por su tamaño, ya que este spot aumentado su tamaño durante las reacciones.

Los resultados de ambas pruebas se ven en la siguiente Figura 38, en la que se muestra la media ponderada del valor de todos los píxeles de la imagen capturada en la Escala de grises. El primer desnivel

producido a los 13 minutos corresponde con la hidratación por DIW, en la que se producen sombras iniciales y después un breve aumento de luz de la imagen, que alcanza 30 unidades en el valor promediado. A continuación, y durante los siguientes minutos, el hidrogel y el líquido mantienen una reacción duradera que altera la forma semicircular de la lente y que altera el spot; por último, se estabiliza. Mientras que, en el minuto 35, se puede observar la segunda hidratación producida por el NaCl, que también provoca un desvanecimiento y en seguida un pico que supera el valor 70 unidades de promediado de la imagen. Este máximo disminuye lentamente hasta retomar un valor y forma del spot idéntico a la inicial, pasados los 10 minutos.



Figura 38: Prueba de D-1/2 BSA aplicando DIW y distintas concentraciones de NaCl

Para el análisis de las gráficas producidas por las pruebas, no hay que tener en cuenta los picos negativos, ya que son fruto de los desvanecimientos provocados al depositar la gota. Pero sí que tendremos en cuenta los máximos que se producen al comenzar la reacción del hidrogel con el componente depositado.

Por lo tanto, de esta prueba se deduce que hay un efecto notable en la hidratación del hidrogel, tanto con agua desionizada como con cloruro de sodio, sobre el spot de luz formado y capturado por la cámara, que causa la variación de la microlente, deformando el spot visible.

6.4 Medidas Hidrogel D-TEA con deposición NaCl

En esta prueba se procedió a humedecer la lente de hidrogel D-TEA con NaCl en concentraciones de 5 mg/ml, 10 mg/ml y 20 mg/ml. Se empezó con 5 mg/ml de NaCl tras los 20 minutos de medida, 10 mg/ml 8 minutos después, y 20 mg/ml 7 minutos después (Figura 39). Como se estaba viendo en los resultados en tiempo real, la gota de hidrogel retomaba un valor parecido al anterior, pero nunca el mismo, sino que algo más leve. El secado ocurría aproximadamente a los 8 minutos y se procedía a un nuevo humedecimiento. A diferencia del hidrogel anterior, estas reacciones no provocan picos positivos si no que, tras producirse el desvanecimiento ocasionado por hidratación, el valor promediado se va reajustando lentamente hasta alcanzar un valor parecido al anterior.

Aunque los resultados de la gráfica anterior no concuerden exactamente con las proporciones de las cantidades de NaCl añadidas, sí que se aprecia que todas produjeron un efecto similar. De las fotos tomadas durante estos procesos de hidratación (Figuras 40, 41, 42 y 43) se aprecia que el estado final de todas ellas coincide con la misma forma inicial. No obstante, las formas producidas por los spots durante las reacciones no son las mismas, que se puede traducir en que cada cantidad de NaCl añadida reacciona de manera diferente. No obstante, a pesar de la forma de sierra que tiene la siguiente gráfica, los valores promediados nunca vuelven a retomar el mismo valor estable que en el proceso anterior. Igual se queda algo de NaCl en el hidrogel (o afecta a su estructura de forma permanente). Y esto se debe a que probablemente la lente de hidrogel necesite algo más de 7 minutos para secarse.

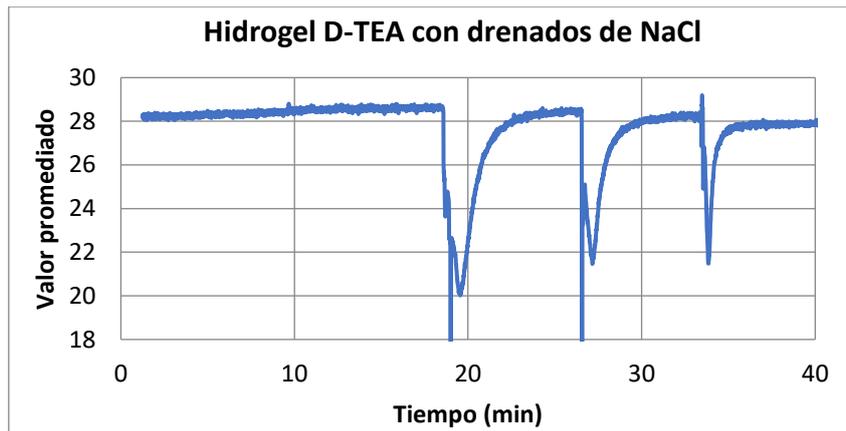


Figura 39: Prueba con Hidrogel D-TEA tras deposiciones de 5, 10 y 20 ml/mg de NaCl

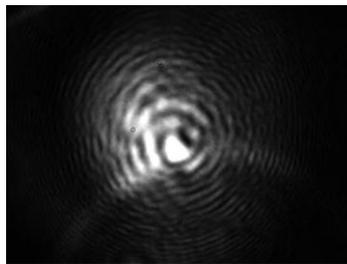


Figura 40: Estado inicial del spot atravesando el Hidrogel D-TEA

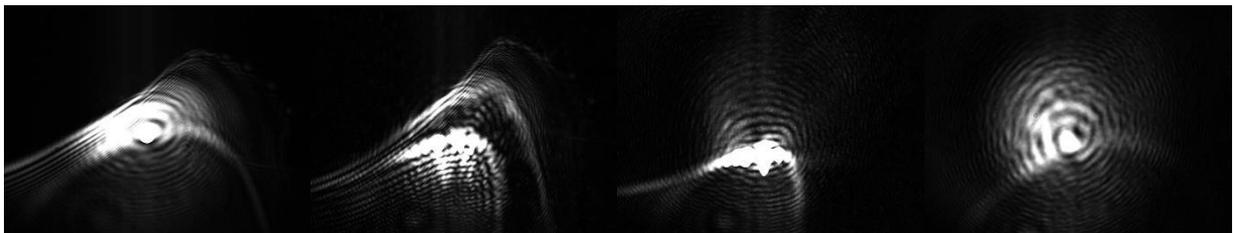


Figura 41: Reacción del spot tras deposiciones de 5 mg/ml de NaCl

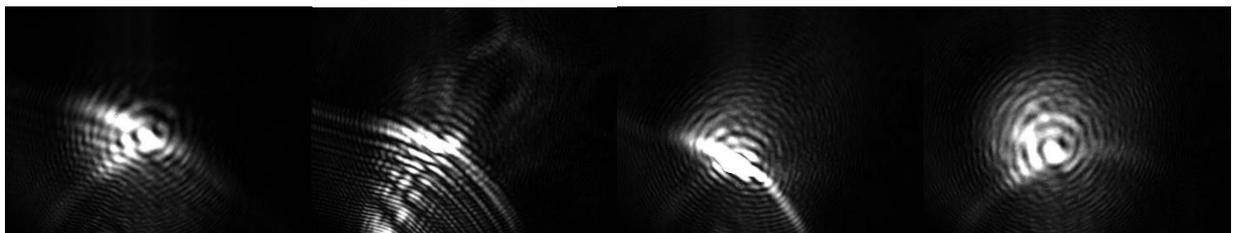


Figura 42: Reacción del spot tras deposiciones de 10 mg/ml de NaCl

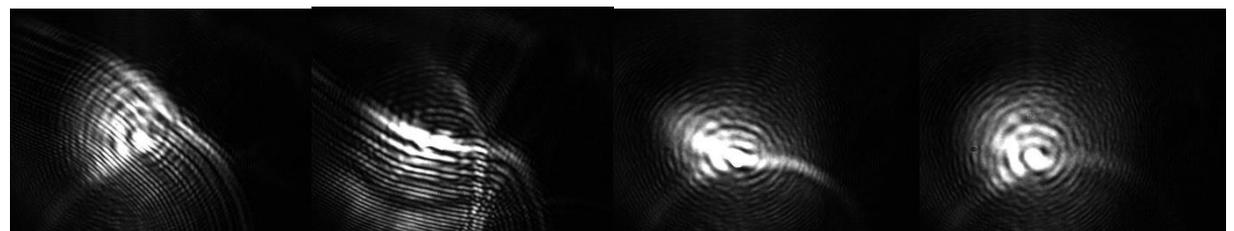


Figura 43: Reacción del spot tras deposiciones de 20 mg/ml de NaCl

Como se observa en las imágenes anteriores de cada proceso de hidratación, el spot de luz vuelve a su patrón inicial tras haberse secado. No obstante, atendiendo a la gráfica, la lente de hidrogel se desenfoca más al aumentar la concentración de sal.

6.5 Medidas D-TEA con Cloruro de Calcio

En este apartado, y empleando una lente de hidrogel similar a la del caso anterior, se va a realizar una prueba similar, pero con CaCl_2 en las mismas concentraciones que anteriormente, 5, 10 y 20 mg/ml. Este componente salínico presenta un aspecto y color similar al NaCl .

Durante pruebas anteriores, se observó que la lente de hidrogel tenía un secado rápido tras hidratación de NaCl . Es por ello por lo que se decidieron realizar numerosas hidrataciones durante la prueba. A los 4 minutos, se inyectaron 5 mg/ml de CaCl_2 . A los 10 minutos del comienzo de la prueba, se repitió este proceso. La cantidad de concentración de 10 mg/ml se inyectó a los 17 minutos del comienzo de la prueba. Tras secado, a los 24 minutos del comienzo se aumentó la cantidad y se inyectó 20 mg/ml y por último en la prueba, se drenó con DIW. Esto son lo que representan los 5 dientes de sierra visibles de la Figura 44.

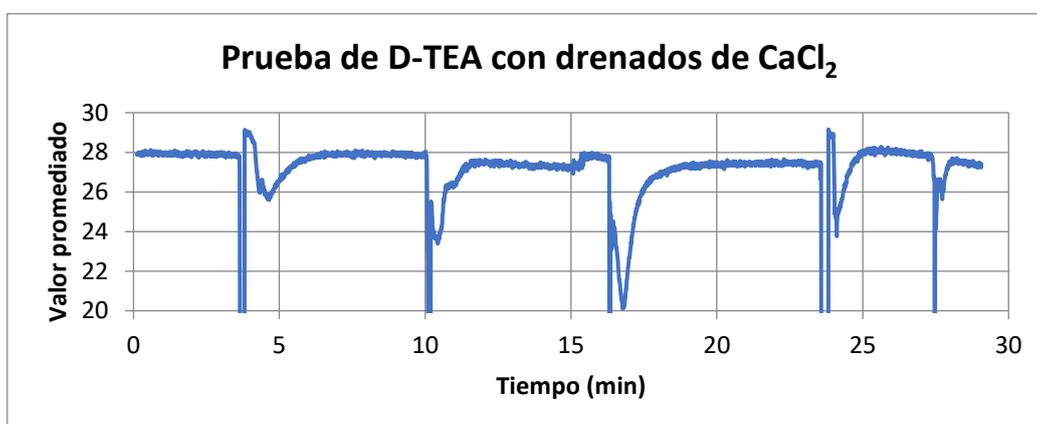


Figura 44: Gráfica de la prueba de Hidrogel D-TEA aplicando 5, 10 y 20 mg/ml de CaCl_2

Como se puede apreciar en la imagen, todas las hidrataciones conllevan un desvanecimiento como ocurre siempre. No obstante, las 2 primeras hidrataciones correspondientes a 5 mg/ml de CaCl_2 no tienen la misma gráfica. Ya que el primero de ellos alcanza un máximo tras desvanecerse, mientras que el segundo de ellos no. Tras ello, el spot de hidrogel se seca y tiende a recuperar el valor del estado inicial, 28. Aunque se puede observar en la gráfica, que tras aplicar por segunda vez 5 mg/ml y de 10 mg/ml, este valor se mantiene constante algo por debajo de 28 unidades, lo que conlleva a suponer que la concentración salínica ha aumentado en la microlente y que por lo tanto el desenfoco producido es mayor.

Tras la penúltima hidratación de la Figura 44, se puede observar que se tiene de nuevo otro máximo. Esto se debe a que, cuando se produce una hidratación con una suficiente cantidad de concentración CaCl_2 esto crea una diferencia entre el hidrogel y el componente líquido y aparecen luces más pronunciadas en el spot durante un breve periodo de tiempo.

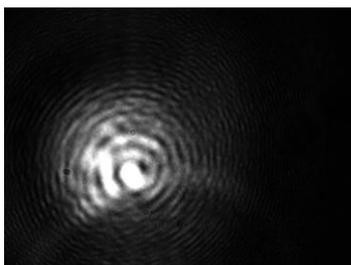


Figura 45: Estado inicial del spot de luz formado al atravesar el hidrogel D-TEA

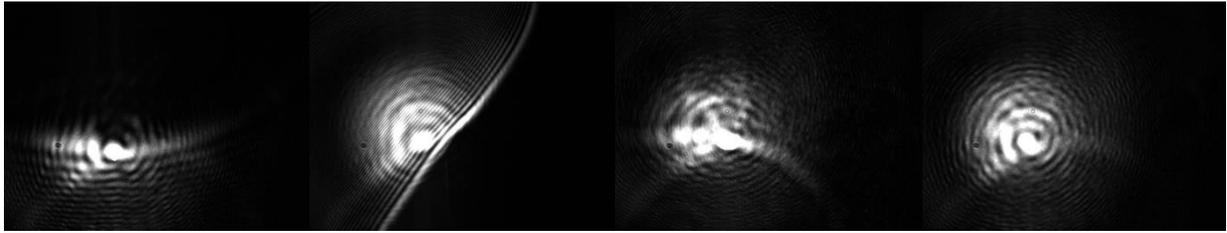


Figura 46: Spot de luz obtenidos con hidrogel D-TEA tras aplicar CaCl_2 5 mg/ml

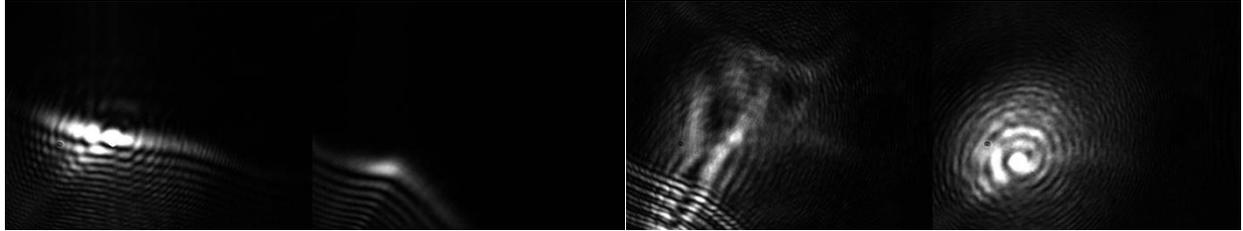


Figura 47: Spot de luz obtenidos con hidrogel M tras aplicar de nuevo CaCl_2 5 mg/ml (2)

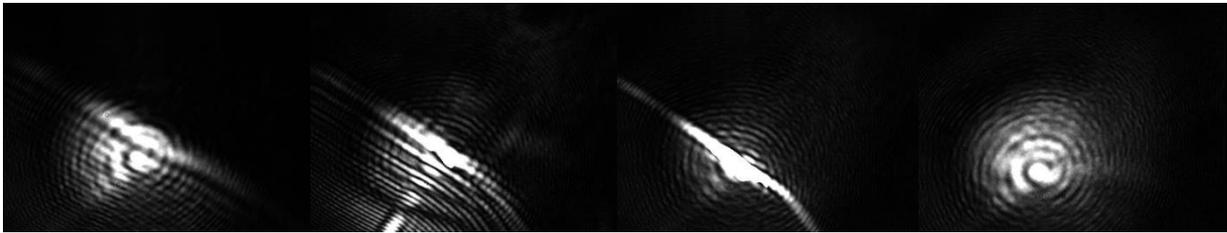


Figura 48: Spot de luz obtenidos con hidrogel D-TEA tras aplicar CaCl_2 10 mg/ml

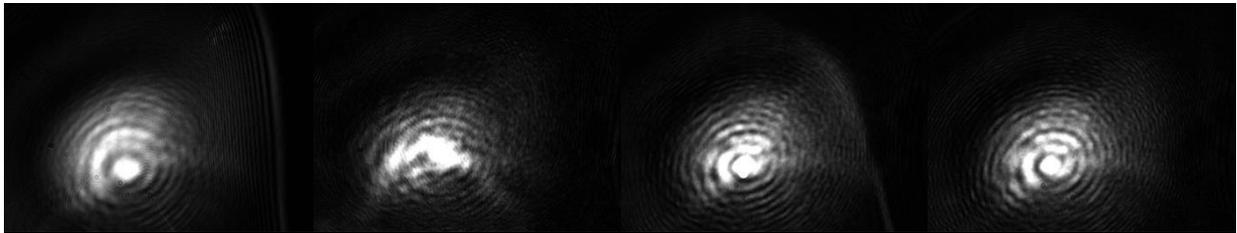


Figura 49: Spot de luz obtenidos con hidrogel M tras aplicar CaCl_2 20 mg/ml

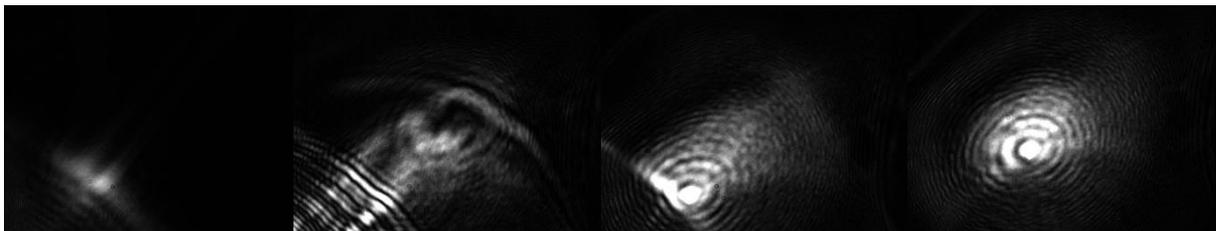


Figura 50: Spot de luz obtenidos con hidrogel M tras aplicar DIW

De las Figuras 46, 47, 48, 49 y 50, se tiene que todas las reacciones producidas son diferentes y que, tras cada reacción, el spot de luz retoma su forma inicial. Esto se puede deber a que las distintas cantidades salínicas afectan de manera diferente al hidrogel, ya que la forma de humedecer la gota es siempre la misma. El drenado se hace mediante una jeringa en la que se deposita una gota a mano y cada vez se deposita en un sitio, de forma diferente, etc.

CAPÍTULO 7

Pruebas realizadas con láser verde ($\lambda=534$ nm)

En las siguientes pruebas, se realizan medidas con una fuente de láser de luz verde porque se observó que el spot de luz conseguido era de tamaño menor y estaba mejor definido que el rojo. El montaje es igual, pero cambia la fuente de luz láser. Por ello, primero se realizó una medida de estabilidad para caracterizar este nuevo equipo. Y a continuación, en línea con las pruebas anteriores, se realizaron hidrataciones de nuevo.

7.1 Prueba de estabilidad con láser verde

A continuación, se muestra el spot visible en la cámara cuando el haz de luz verde incide de manera directa en el interior de la cámara. Si se compara con el spot de luz roja emitido directamente sobre la cámara desde la otra fuente de luz láser (Figura 51), se observa que el spot de luz verde es de menor tamaño que el de luz roja: aproximadamente la mitad. Esto es debido a las diferencias existentes entre las características de las fuentes de luz láser además de los voltajes y de las intensidades. Fuente de luz láser verde alimentada con 3.31 V y 26 mA. Debido a las exigencias electrónicas de cada fuente, se ha escogido la mejor combinación de voltaje y corriente eléctrica para garantizar una emisión que fuera estable durante horas y poder obtener una imagen nítida en la cámara.

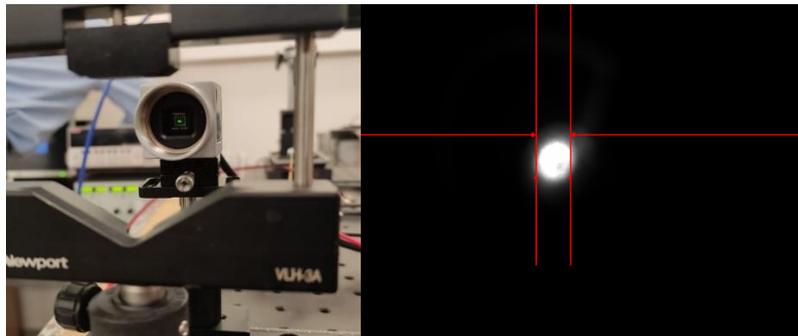


Figura 51: Spot de luz verde incidiendo directamente en la cámara (izquierda) y spot capturado (derecha)

Las líneas horizontales y verticales que aparecen en la imagen muestran que el programa es capaz de captar intensidades del borde de figuras redondas y de reconocer “inteligentemente” los spots incididos en la cámara.

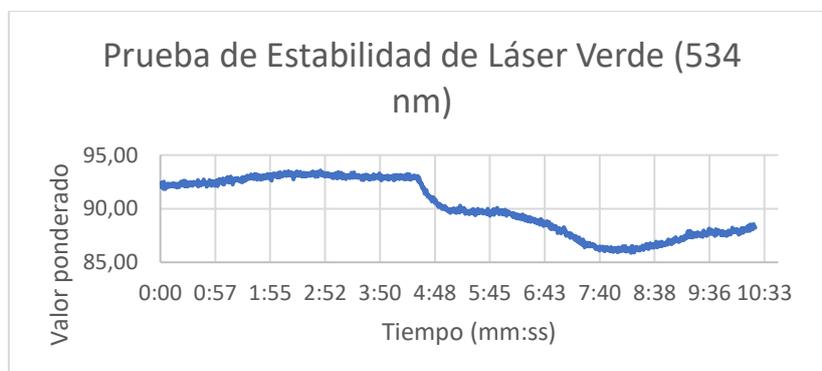


Figura 52: Prueba de estabilidad de láser verde con media móvil durante 13 minutos

Se observa en la gráfica que la curva alcanza un máximo en 93 unidades y su mínimo en 86 unidades. Esta estabilidad presenta una desviación de 0.7 unidades y es peor que la del láser rojo, que presentaba 0.3 unidades de variación.

7.2 Medidas D-1/2 BSA con 10 mg/ml de CaCl₂

En la siguiente prueba, se drenó 10 ml/mg de CaCl₂ sobre el hidrogel D-1/2 BSA y se observó que esta vez los materiales sí que interactuaron. En la siguiente figura, se observa un leve desvanecimiento producido por la deposición de la gota, al que le suceden unas alteraciones durante segundos, que alteran en muchas maneras la forma del spot captado por la cámara. Las formas creadas son uniformes y no suelen mantener la circularidad del spot inicial. Pasado 1 minuto, el spot de luz vuelve a su forma original, pero con un tamaño menor considerable y que va disminuyendo lentamente. Este efecto es producido por la deshidratación de la lente de hidrogel, que es más fuerte, que el producido por el CaCl₂ que hace aumentar el valor medio del spot de luz tras la reacción producida. A diferencia de las pruebas anteriores con el láser rojo, que estos valores retomaban un valor próximo a la inicial, con la luz verde se ve que tras los drenados el valor promediado disminuye levemente.

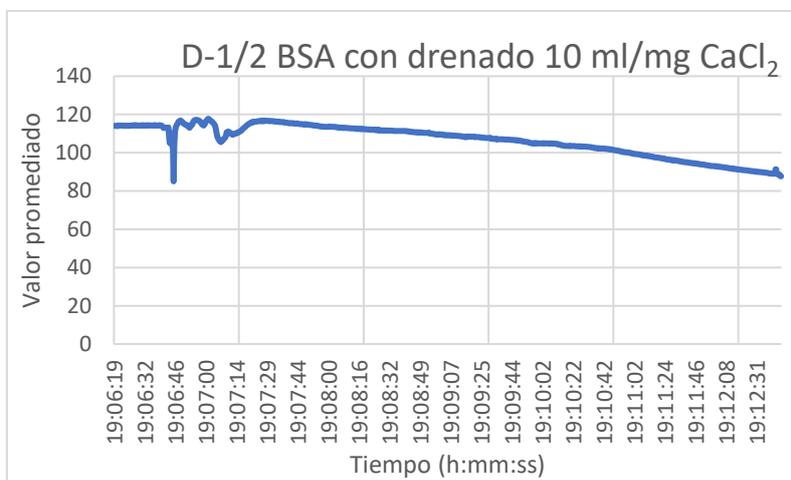


Figura 53: Gráfica prueba D-1/2 BSA aplicando 10 ml/mg de CaCl₂, e iluminado con el láser verde

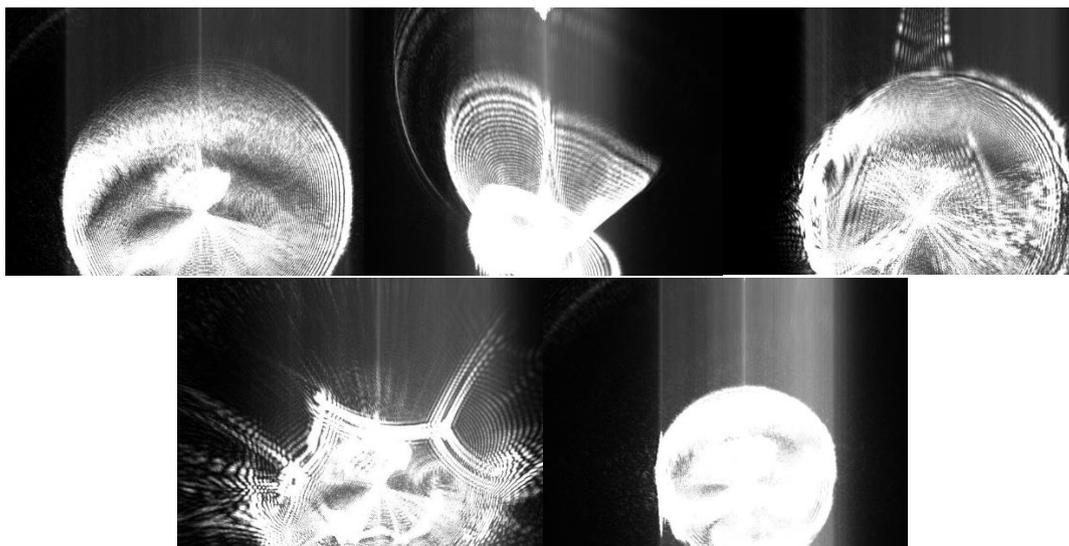


Figura 54: Spots de luz capturado en presencia de 10 ml/mg de CaCl₂ sobre D-1/2 BSA estado inicial (1ª fila izquierda), reacción (1ª fila centro), reacción 2 (1ª fila derecha), reacción 3 (2ª fila izquierda), estado final (2ª fila derecha)

7.3 Lente de hidrogel D-1/2 BSA aplicando 5 y 20 ml/mg de CaCl₂

En la siguiente prueba, se ha depositado 5 y 20 ml/mg de CaCl₂, en diferentes momentos durante la prueba. En una primera fase, se introdujo una cantidad de CaCl₂ más pequeña que posteriormente. Se puede ver en la gráfica de la siguiente Figura 55, tanto en la curva del valor promediado como en la del ancho del spot, que esta pequeña cantidad provoca efectos notables en el spot, aunque menores que cuando se añadió 20 ml/mg de CaCl₂. La curva del ancho de spot se ha añadido para contrastar con la del valor promediado y, como se puede ver, ambas siguen una correspondencia similar: ya que sufren alteraciones con la hidratación y se mantienen estables cuando el spot de luz está “en reposo”.

Esta última cantidad mayor de CaCl₂, además de alterar en mayor medida el spot de luz, también provocó un efecto mucho más duradero. El estado final del spot de luz resultó ser más luminoso que el estado inicial; con lo que, se puede concluir, que una buena dosis de CaCl₂ consigue hidratar al hidrogel D – ½ BSA haciendo que el spot aumente ligeramente. Como se puede comprobar en las imágenes de la Figura 56.

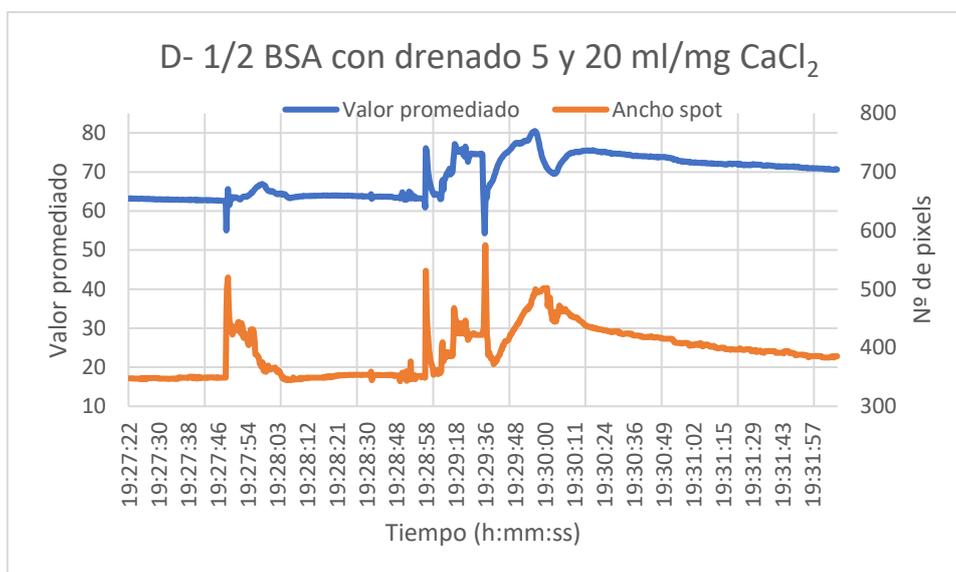


Figura 55: Gráficas prueba D-1/2 BSA con deposición de 5 y 20 ml/mg CaCl₂, empleando el láser verde

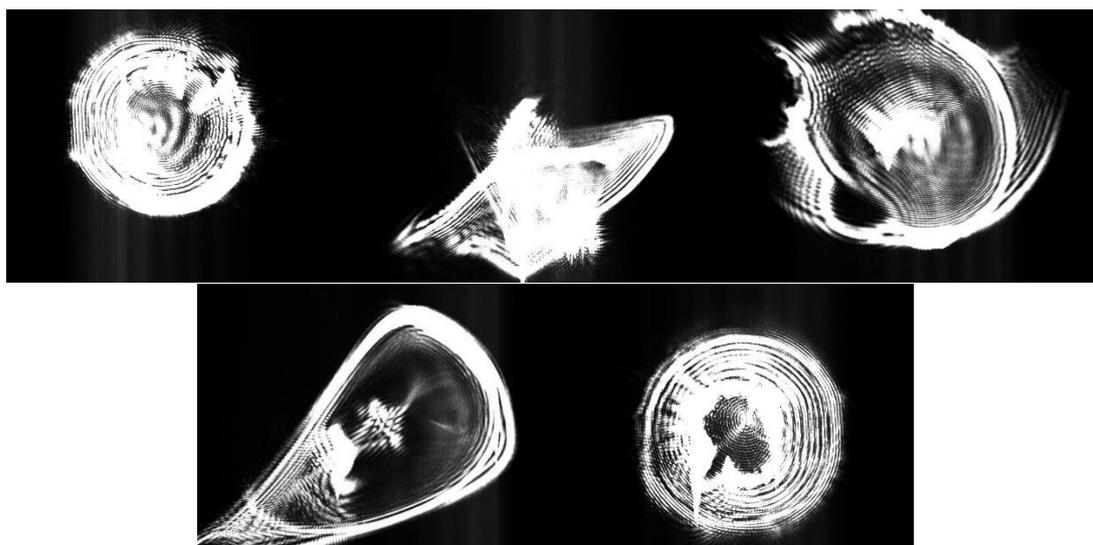


Figura 56: Spots de luz capturado en presencia de 5 y 20 ml/mg de CaCl₂ sobre D-1/2 BSA estado inicial (1ª fila izquierda), máximo 1 (1ª fila centro), máximo 2 (1ª fila derecha), máximo 3 (2ª fila izquierda), estado final (2ª fila derecha)

7.4 Medidas de secado gota hidrogel

Como ya se ha mencionado anteriormente, las láminas con las gotas de hidrogel se guardan en un recipiente con DIW en su interior para evitar que se deshidraten con el paso del tiempo. No obstante, esto no siempre garantiza una mejor conservación y en ocasiones los hidrogeles han reducido su tamaño debido a la evaporación. Las gotas de hidrogel se D-1/2 BSA son las que presentaban un mejor aspecto físico y redondeado, por lo tanto, se siguió trabajando con ellas. En la siguiente Figura 57, se muestra una gota de dicho hidrogel que presentaba una forma semi esférica, de diámetro 5 mm, y fue colocada a 1 cm de distancia del objetivo de la cámara y se le incidió con láser de luz verde. El hidrogel brilla y todavía está húmedo tras ser sacado del recipiente. Se esperan unos minutos para ver si se seca.

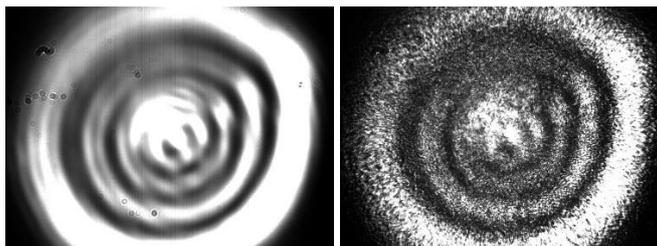


Figura 57: Spot de luz capturado por la cámara (izquierda) tras tratado con programa en LabView (tiempo de exposición, ganancia, gamma) (derecha)

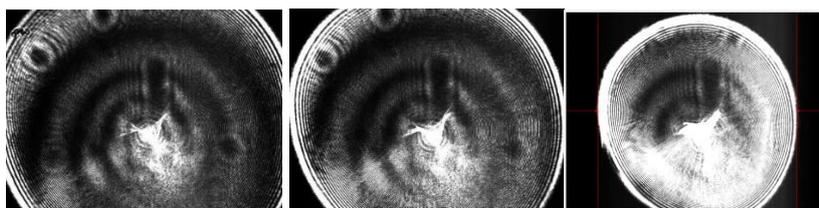


Figura 58: Spot de luz capturado por la cámara tras 30 mins (izquierda), 35 mins (centro) y 40 mins (derecha)

Como se observa en la Figura 58, el spot de luz va reduciendo su tamaño con el tiempo debido a la evaporización. Tras esperar 40 minutos, se observa que el spot ha reducido su tamaño considerablemente y es apreciable que la gota de hidrogel se ha aplanado, perdiendo así su forma semiesférica inicial.

7.5 Lente de hidrogel D-1/2 BSA con 5 ml/mg de NaCl y 20 ml/mg de NaCl

En la siguiente prueba, tras elección de una nueva gota del mismo hidrogel y puesta a medida, se realizaron pruebas de hidratación de 5 ml/mg y 20 ml/mg de NaCl, respectivamente. La duración fue de 12 minutos. En la siguiente figura, se pueden observar 2 mínimos correspondientes a estos humedecimientos. Estos son debidos a los desvanecimientos producidos cuando el líquido introducido invade la gota de hidrogel en cuestión. Como ocurre cada vez, tras este efecto, se produce una reacción inmediata que produce un aumento en el valor medio recogido. Esto se traduce en un juego de luces producido por los intercambios químicos entre el hidrogel y el líquido aplicado. A continuación, se estabiliza y disminuye ligeramente, debido a la evaporación.

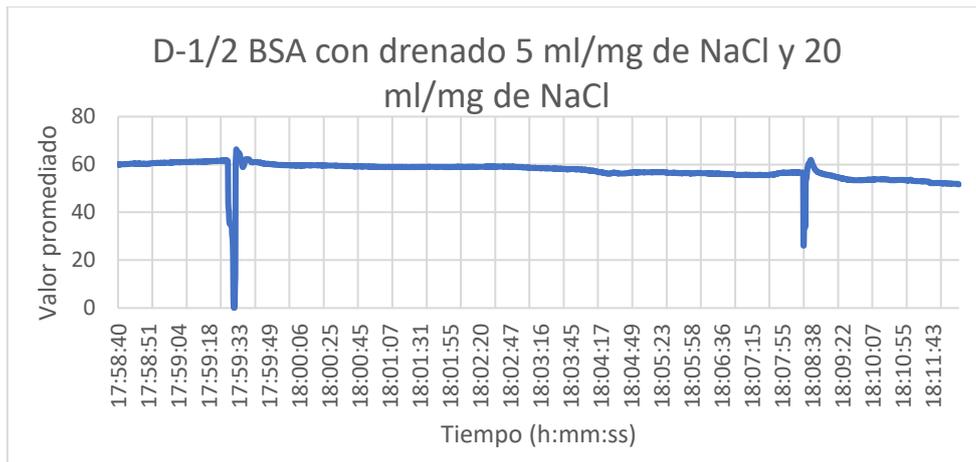


Figura 59: Gráfica prueba D-1/2 BSA aplicando 5 ml/mg y 20 ml/mg de NaCl

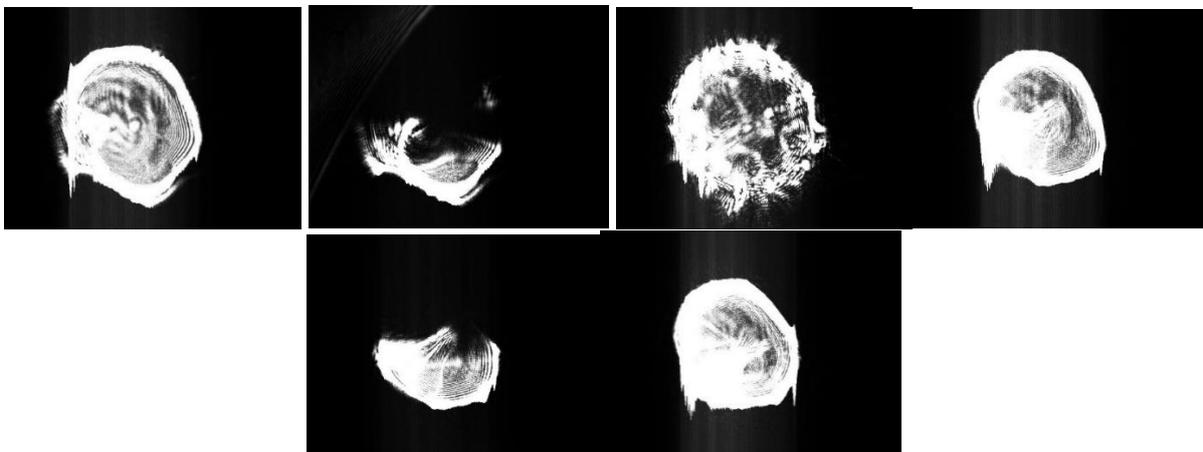


Figura 60: Spots de luz capturado al aplicar 5 ml/mg y 20 ml/mg de NaCl sobre D-1/2 BSA: estado inicial (1ª fila izquierda), desvanecimiento 1 (1ª fila centro), reacción (1ª fila derecha), estado intermedio (2ª fila izquierda), desvanecimiento 2 (2ª fila centro), estado final (2ª fila derecha)

Se puede observar en la Figura 59, que el mínimo producido por la deposición de 5 ml/mg es más pronunciado que el posterior de 20 ml/mg. Aunque este primer desvanecimiento es total, no se muestra en la anterior figura, ya que es únicamente un fondo negro. Pero sí que se muestra justo la imagen correspondiente con las décimas de segundo anteriores (1ª fila centro).

No obstante, se puede observar algo que venía en línea con los resultados de las 2 pruebas anteriores hechas por separadas. Aunque cabe imaginar que lo lógico sería que la hidratación de 20 ml/mg fuese más pronunciado que el de 5 ml/mg, no siempre es así. El programa captura los datos cada 0.2 segundos y coger una fracción de tiempo que no fuese la mínima. O al revés. Pero lo que sí que se puede observar detalladamente es que al aplicar los 5 ml/mg produce la re-estabilización del valor promediado anterior tras la reacción, mientras que al aplicar 20 ml/mg, tras reacción, reduce este valor, reduciendo así los puntos de luz ocasionados en el spot. Es decir, que, aunque el desvanecimiento no siga la lógica esperada, el impacto ocasionado sí.

CAPÍTULO 8

Pruebas realizadas con fuente de luz blanca

En las siguientes pruebas, se cambió la fuente de luz láser por una fuente de luz blanca. Esta modificación se hizo con intención de contrastar resultados y ver si también se observaría variación tras las hidrataciones. El haz de luz de la fuente blanca presenta más dispersión y es menos directivo que los haces de los láseres; por ello, era necesario colocar esta nueva fuente muy cerca de la lámina donde están los hidrogeles (D-TEA), a unos pocos milímetros, para que enfocase correctamente en el interior de la cámara. De lo contrario, la incidencia directa sobre el objetivo de la cámara era tan ancha que saturaba toda la imagen y solamente se apreciaba un saturado fondo blanco. La lámina a su vez seguía distanciada de la cámara de unos 3 cm de su centro y de esta manera, el spot era fácilmente observable en la imagen capturada por la cámara.

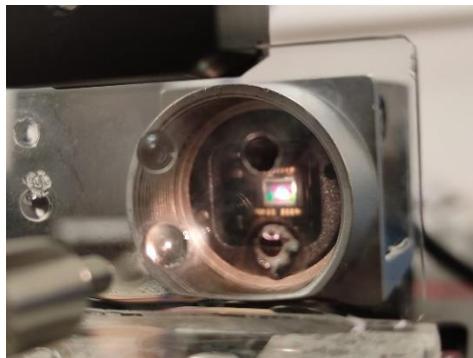


Figura 61: Sensor de la cámara con spot de luz blanca tras incidir en una lente de hidrogel

Además, se estaba consiguiendo que la mejora del software implementada en LabView reconociera el spot y que lo midiese de manera precisa. Con lo que nos resultó conveniente seguir adelante y empezar con algunas pruebas, en las que se utilizó siempre D-TEA como lente de hidrogel, debido a que eran las que mejor forma semiesférica presentaban.

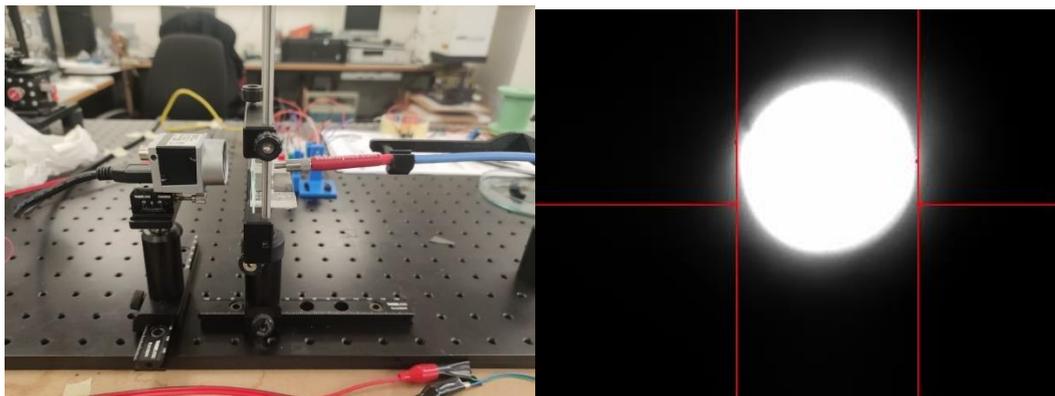


Figura 62: Perfil experimental con la fuente de luz blanca y su imagen capturada por el programa de LabView

8.1 Medidas D-TEA con DIW

En una primera prueba con la fuente de luz blanca incidiendo sobre D-TEA en la cual se ha depositado DIW.

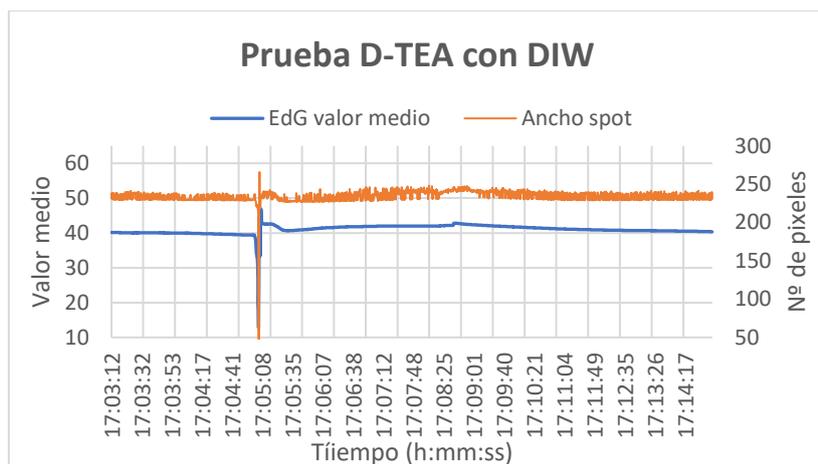


Figura 63: Gráfica prueba D- TEA con DIW con luz blanca



Figura 64: Spot capturado por la cámara cuando se incide con luz blanca: estado inicial (izquierda), desvanecimiento (derecha), estado final (abajo)

Como se puede apreciar en la gráfica, aparecen 2 líneas distintas: Escala de grises valor medio y Ancho spot. El primero de ellos, es lo que se venía enseñando hasta ahora y a modo de recuerdo, representa el valor medio en la Escala de Grises de todo el conjunto de píxeles de la imagen (color azul). Mientras que la línea naranja representa el ancho de luz capturado “inteligentemente” por la mejora del programa de LabView. Este detecta patrones de valor alto en la escala de grises y traza una línea por cada lateral; después suma todos los píxeles comprendidos en esa franja. Por ello, las líneas siguen diferentes escalas: una del valor medio de la Escala de grises y otra referente al número de píxeles.

En cuanto a interpretación de resultados, se puede observar que ambas líneas siguen el mismo patrón: inicialmente son estables, tienen una irregularidad presentada por un desvanecimiento, tras ello un aumento repentino, que tiende a estabilizarse aumentando ligeramente y, por último, tiende a descender. La curva del ancho del spot presenta ciertas irregularidades que son debidas a que, de vez en cuando, la cámara detecta algún píxel blanco desplazado y las franjas rojas de la pantalla aumentan o disminuyen.

8.2 Medidas D-TEA con 20 ml/mg NaCl

En esta prueba se ha utilizado la fuente de luz blanca incidiendo sobre D-TEA en la cual se ha depositado 20 ml/mg de concentración.

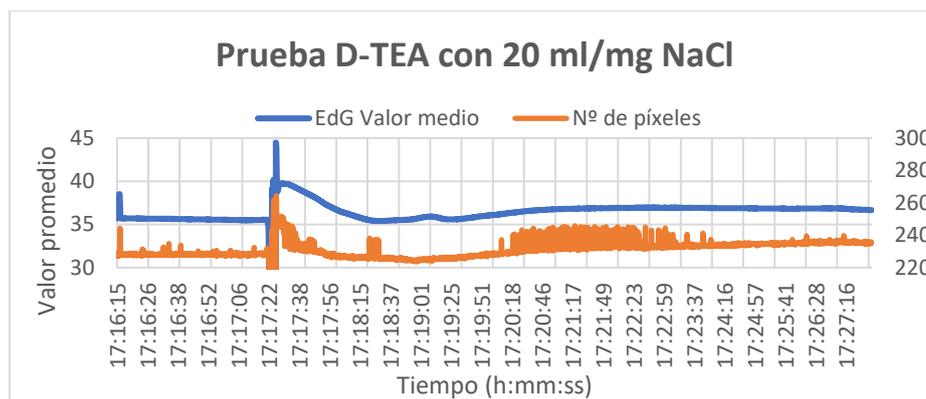


Figura 65: Gráficas prueba D-TEA con 20 ml/mg NaCl con luz blanca

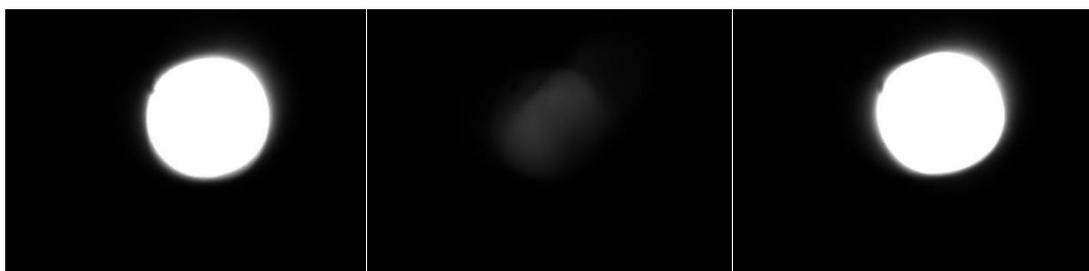


Figura 66: Spot capturado por la cámara cuando se incide con luz blanca y se aplica 20 ml/mg de NaCl: estado inicial (izquierda), desvanecimiento (derecha), estado final (abajo)

En esta prueba, al igual que en la anterior, se puede observar que ambas series de líneas siguen el mismo recorrido. No obstante, en la prueba anterior, tras humedecer con DIW el valor Escala de grises medio descendía de 37 a 12, ahora, tras aplicar NaCl, este desciende de 37 hasta un valor de 4, que es más pronunciado que el de la prueba de 10 ml/mg de concentración de NaCl en agua.

De la gráfica, se observa que, tras 10 minutos desde la deposición, la microlente está más hidratada que inicialmente ya que ambos valores, el promediado y nº de píxeles, están ligeramente por encima del valor del comienzo de la prueba. Con lo que la microlente de hidrogel no se ha secado todavía y siguen existiendo reacciones en su interior. Se observa que este comportamiento es algo constante y continuo, como se ha estado viendo en las medidas con el láser rojo, pero no con el verde.

8.3 Medidas D-TEA aplicando hasta 4 veces 5 ml/mg NaCl

Esta prueba se hizo muy rápidamente debido a la evaporación de las lentes de hidrogel. La intención era hidratar repetidas veces en un corto periodo de tiempo para que el efecto de deshidratación impactara lo mínimo posible y ver si se repetían los mismos desvanecidos. Es decir, para ver si tras cada deposición de 5 ml/mg, se observaba una disminución y recuperación idéntica. En las siguientes gráficas, se puede ver, de nuevo, que el valor promediado y el ancho de spot van al mismo compás. Es decir, tras cada hidratación, se observa un patrón post reactivo parecido al anterior y también se pueden apreciar los mínimos consecuentes del desvanecimiento producido. Aunque, conforme avanza el tiempo y se seca la hidratación, se tiene que las curvas se estabilizan en un ligero valor superior al estado inicial. Esto se puede deber a la cantidad de NaCl acumulada en la lente de hidrogel.

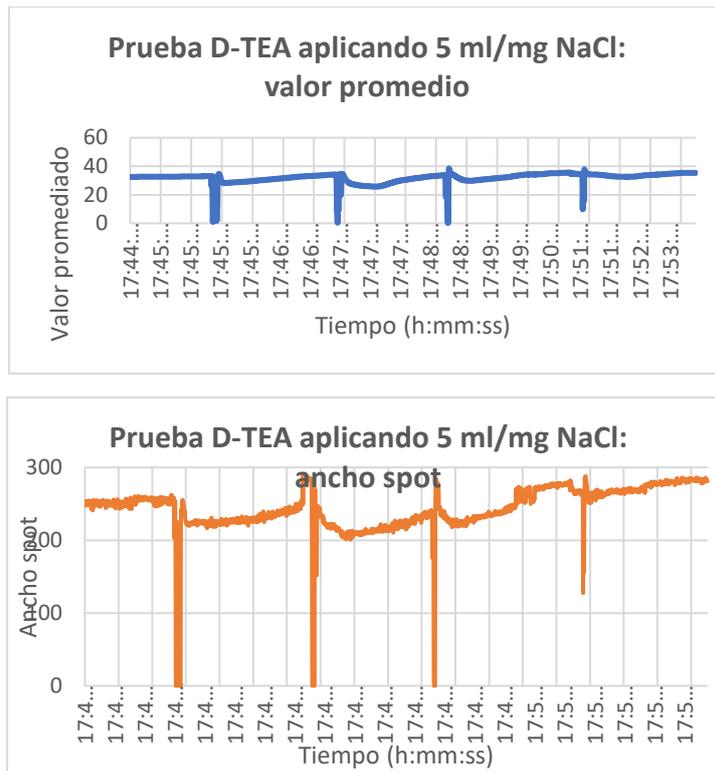


Figura 67: Gráficas pruebas de D-TEA con 5 ml/mg NaCl con luz blanca: valor promedio (arriba) y ancho spot (abajo)

En ambas gráficas, se puede notar que, tras las hidrataciones, se producen desvanecimientos mecánicos (fáciles de apreciar en las figuras) y posteriormente los comportamientos ocurridos son algo parecidos. Es decir, tienen una ligera caída a veces poco notable, y entonces aumentan lentamente durante los próximos minutos. En el acumulado de las hidrataciones, se puede ver que el valor final es superior al valor inicial. Esto se debe a que la microlente de hidrogel contiene NaCl en su interior que lo hidrata y que sigue reaccionando.

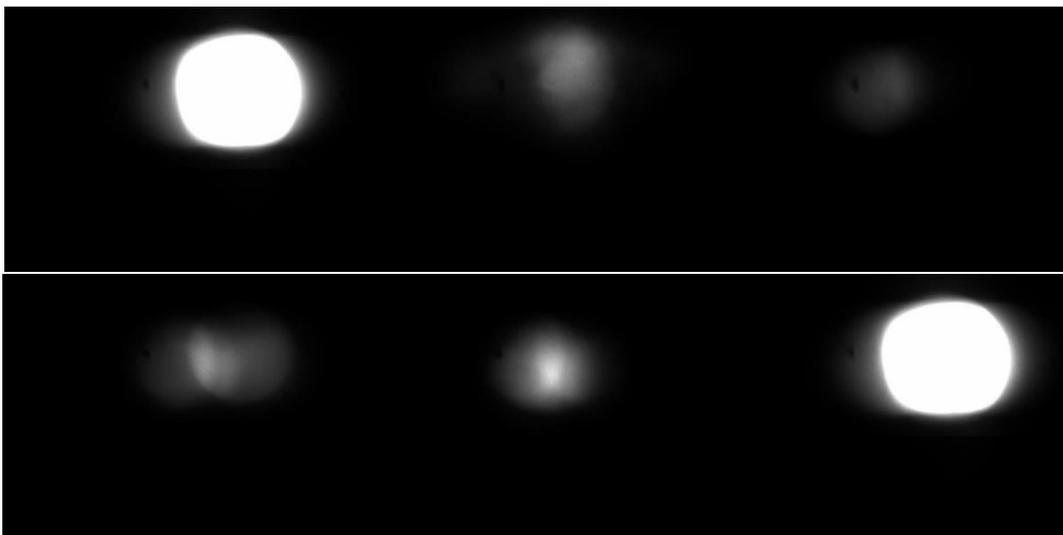


Figura 68: Prueba D-TEA con 4 aplicaciones 5 ml/mg NaCl: estado inicial (1ª fila izquierda), desvanecimiento 1 (1ª fila centro), desvanecimiento 2 (1ª fila derecha), desvanecimiento 3 (2ª fila izquierda), desvanecimiento 4 (2ª fila centro), estado final (2ª fila derecha)

De las figuras anteriores, se puede observar que los desvanecimientos producidos tras cada hidratación son diferentes entre ellos, incluso cuando la cantidad añadida y el concentrado ha sido el mismo.

CAPÍTULO 9

Conclusiones

Durante este proyecto, se han abordado los objetivos principales planteados. Entre ellos, se encontraban: el diseño de un montaje experimental para realizar un sensor óptico, la caracterización de las variaciones de luz al utilizar un hidrogel como lente a la cual se variaba su forma mediante la aplicación de un líquido, y el diseño de un software capaz de procesar y tratar los resultados.

En primer lugar, se trabajó con programas de representación de modelos fotónicos con el objetivo inicial de seleccionar el más adecuado para nuestra maqueta experimental. Tras ello, se realizaron simulaciones con posibles escenarios de lo que sería el montaje de pruebas y resultados. En ellas, se estuvo variando algunos de los parámetros más fundamentales para comenzar a caracterizar los llamados conos de luz, donde toda la luz se concentraba. Lo que nos permitió dar una estimación, en resultados teóricos, de los fenómenos reproducidos y las distancias de medida que se andaban buscando antes de conocer el compuesto de hidrogel con el que trabajaríamos más adelante.

A esto, se le sumaron los resultados del primer montaje experimental provisional, que consistiría en la caracterización del tamaño de dicho spot de luz proyectado sobre papel milimétrico cuando atraviesa lentes realizadas con gotas de DIW o PMMA.

En siguiente lugar, se realizó el diseño de un montaje experimental, basado en el alineamiento de una fuente de iluminación, objeto a testear, y sensor de luz, con el objetivo de observar las variaciones ocasionadas por la hidratación de dicho elemento a testear. En estas pruebas, se vio que tanto las microlentes de hidrogel D-1/2 BSA como D-TEA, reaccionan y alteran su forma cuando se hidratan con disoluciones acuosas con CaCl_2 o NaCl . Con estas alteraciones de las propiedades del hidrogel producidas por el contacto de medios líquidos, se pudieron realizar medidas de sensado a partir de enfoque – desenfoco producido por la lente al hincharse y al variar su diámetro. Se creo entonces un sensor fotónico caracterizable.

Además, se ha conseguido el diseño de una aplicación de LabVIEW controlado por el usuario desde una interfaz intuitiva, que sincroniza la imagen de la cámara a tiempo real durante la medida. También, este software permite tomar capturas y registrar los principales datos de la imagen para posterior tratamiento. Los cambios producidos por las reacciones tras las hidrataciones eran notables: no solo por los datos recogidos y las gráficas obtenidas, sino también por las formas y figuras producidas que se observaban en la pantalla del ordenador.

La realización de numerosas pruebas y la repetición de estas ha permitido la selección de materiales y compuestos óptimos. En algunas ocasiones, sobre todo en presencia de gotas de hidrogel bien hidratadas, estas alteraciones formaban figuras visuales en un baile de luces causado por la reacción química producida. En otras ocasiones, como con la fuente de luz blanca, menos colimada, y con una gota de hidrogel algo más deshidratada, la variación del spot de luz fue tan mínima que era necesario recurrir al tratamiento de los datos para poder observar cambio alguno. Ya que, las gotas de hidrogel con el paso del tiempo se deterioraban y perdían parte de su forma convexa al secarse.

Se ha observado también por los resultados de las medidas con la fuente de luz láser roja, que tanto el NaCl como el CaCl_2 mostraban un comportamiento más o menos idéntico. Ya que ambas hidrataciones producciones mínimos que tras 10 minutos recuperaban un valor próximo al inicial. Aunque la reacción total podía durar varios minutos más. Mientras que, en las pruebas con fuente de luz láser verde, este efecto se ha visto menos. En estas segundas pruebas, ambas hidrataciones provocaban una caída suave que no retomaba valores iniciales. Esto se puede deber a que, por algún motivo la luz verde no capta las mismas reacciones producidas que la luz roja para estos materiales y compuestos. La luz blanca, sin embargo, al ser algo más ancha y potente, alumbraba por completo la lente de hidrogel lo que provocaba que no se pudiese ver en detalle las

reflexiones que ocurrían en su interior, sino que mostraba únicamente el círculo en blanco. Aunque también sensible a estos cambios, con unos resultados algo similares a los del haz de luz rojo.

En este proyecto, se ha iniciado una vía de estudio hacia las microlentes de hidrogel como sensores fotónicos que puede dar nacimiento a futuras líneas de aplicaciones.

Propuesta de trabajo futuro

1. Para un próximo avance de este proyecto, sería conveniente ahora que se ha probado en este trabajo, la selección de un compuesto de hidrogel como el D-1/2 BSA o el D-TEA, que se muestran resistentes y reaccionan de manera notable con los distintos materiales acuosos utilizados. Una desconocida elección de estos materiales puede llevar a hidrogeles fáciles de deteriorarse que no muestren resultados ni reacciones esperadas o caracterizables.
2. Ahora que también se sabe, con el paso del tiempo, estas pequeñas gotas de hidrogel tienden a deshidratarse provocando una reducción de su tamaño o deterioración de su aspecto y forma que pueden dar a efectos indeseados. Es recomendable, realizar experimentos con lentes de hidrogel tras su fabricación, y lo menos utilizadas posibles.
3. Un sistema de drenado, que no dañe la lente al depositar gotas líquidas. Ya que, a pesar de los resultados positivos, los desvanecimientos ocurridos y vistos durante las gráficas y las figuras, son debidos al efecto mecánico de la deposición. Mientras que con un sistema de drenado que humedeciese lentamente la microlente, no se percibirían sombras de este tipo y se visualizaría mejor el impacto de la hidratación. Además, las particularidades de algunos hidrogeles, lo convierten en un compuesto hidrófobo. En algunas pruebas, al depositar las gotas del componente líquido sobre el hidrogel, este se veía deteriorado por el impacto, como pasaba con la muestra de hidrogel M, para la cual al final se decidió no incluir los resultados en la memoria por resultar confusos e incoherentes.
4. El uso de herramientas de software “inteligentes” en LabVIEW que sean capaces de reconocer y medir con precisión el punto de luz capturado por la cámara, así como sus variaciones. Durante este proyecto se han mostrado varias técnicas, pero debido a las formas de los spots de luz, algunas han sido tan poco fiables que han tenido que verse descartadas.
5. Y la última propuesta de mejora, sería crear un escenario diferente en el que la cámara se sustituye por un fotodiodo. En este caso, más económico, se mediría la potencia de la luz tras atravesar la lente de hidrogel. Dicha potencia por unidad de superficie variará según el diámetro del spot resultante debido al enfoque - desenfoque producido en la lente al entrar en contacto con medios líquidos.

Bibliografía

- [1] A.K. Yetisen, H. Butt, L.R. Volpatti, I. Pavlichenko, M. Humar, S.J.J. Kwok, H. Koo, K.S. Kim, I. Naydenova, A. Khademhosseini, S.K. Hahn, S.H. Yun. **Photonic hydrogel sensors**. *Biotechnol. Adv.*, 34 (2016), pp. 250-271
- [2] Kang, H. K., Bang, H. J., Hong, C. S., & Kim, C. G. (2002). **Simultaneous measurement of strain, temperature and vibration frequency using a fibre optic sensor**. *Measurement Science and Technology*, 13(8), 1191.
- [3] Danzmann, K., & LISA Study Team. (1996). **LISA: laser interferometer space antenna for gravitational wave measurements**. *Classical and Quantum Gravity*, 13(11A), A247.
- [4] Ismail, M. A., Tamchek, N., Hassan, M. R. A., Dambul, K. D., Selvaraj, J., Rahim, N. A., ... & Adikan, F. R. M. (2011). **A fiber Bragg grating—bimetal temperature sensor for solar panel inverters**. *sensors*, 11(9), 8665-8673.
- [5] Wichterle, O., & Lim, D. (1960). **Hydrophilic gels for biological use**. *Nature*, 185(4706), 117-118.
- [6] Ehrick, J., Stokes, S., Bachas-Daunert, S., Moschou, E., Deo, S., Bachas, L. and Daunert, S. (2007), **Chemically Tunable Lensing of Stimuli-Responsive Hydrogel Microdomes**. *Adv. Mater.*, 19: 4024-4027.
- [7] Bashir S, Hina M, Iqbal J, et al. **Fundamental Concepts of Hydrogels: Synthesis, Properties, and Their Applications**. *Polymers (Basel)*. 2020;12(11):2702. Published 2020 Nov 16.
- [8] Vincent Reboud, Isabel Obieta, Leire Bilbao, Virginia Saez-Martinez, Mickael Brun, Fabien Laulagnet, Stefan Landis. **Imprinted hydrogels for tunable hemispherical microlenses**. *Microelectronic Engineering*, Volumen 111, 2013, Páginas 189-192.
- [9] Akhtar, M. F., Hanif, M., & Ranjha, N. M. (2016). **Methods of synthesis of hydrogels... A review**. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 24(5), 554-559.
- [10] Rogel-Hernández, E., Licea-Claveríe, A., Cornejo-Bravo, J. M., & Arndt, K. F. (2003). **Preparación de hidrogeles anfífilicos sensibles a diferentes valores de pH utilizando monómeros ácidos con espaciadores hidrofóbicos**. *Revista de la Sociedad Química de México*, 47(3), 251-257.

Glosario de términos

Escala de grises: Es una escala empleada en imagen digital en la que el valor de cada píxel posee un valor equivalente a una graduación de gris.

Fotodiodo: Elemento conductor que genera corriente al ser excitado por luz.

Grid Size: Tamaño del mallado utilizado para la definir la calidad de las simulaciones. Se mide en μm .

Hidrogel: Material compuesto generalmente a base de polímeros con propiedades particulares. Utilizado como biomaterial, reacciona al entrar en contacto con sistemas biológicas.

Interferencia constructiva: Efecto físico producido cuando ondas lumínicas se suma o superponen en fases provocando una onda resultante de mayor amplitud.

Interferencia destructiva: Efecto físico producido cuando ondas lumínicas restan o se anulan en fases provocando una onda resultante de menor amplitud.

Launch Width: Ancho de la fuente de excitación utilizado durante las simulaciones en RSoft (en μm).

Lente convergente: Lente cuyos rayos paralelos de luz atraviesan y se encuentran en un punto convergente.

Microlente: Lente con una apertura de unos pocos milímetros. Puede funcionar por difracción, refracción o una combinación de estas.

Nanofotónica: En escala nanométrica, estudia las interacciones fisicoquímicas entre la luz y la materia.

Punto focal (spot): Punto en el que convergen los rayos de luz de una fuente (láser) al atravesar una lente.

Sensor óptico: Dispositivo con la capacidad para detectar haces de luz y convertirlos en señales electrónicas.

Abreviaturas

Ca₂Cl	Cloruro de calcio
CCD	Dispositivo de Carga Acoplada
D-1/2 BSA	Hidrogel 1
DIW	Agua desionizada
D-TEA	Hidrogel 2
EtOH	Etanol
FDTD	Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo
FEM	Método de Elementos Finitos
Gbit/s	Gigabit por segundo
M	Hidrogel 3
mA	Miliamperios
NaCl	Cloruro de sodio
NTC	Nanophotonic Technologic Center
PMMA	Polimetilmetacrilato

Diagrama de bloques del programa de LabVIEW

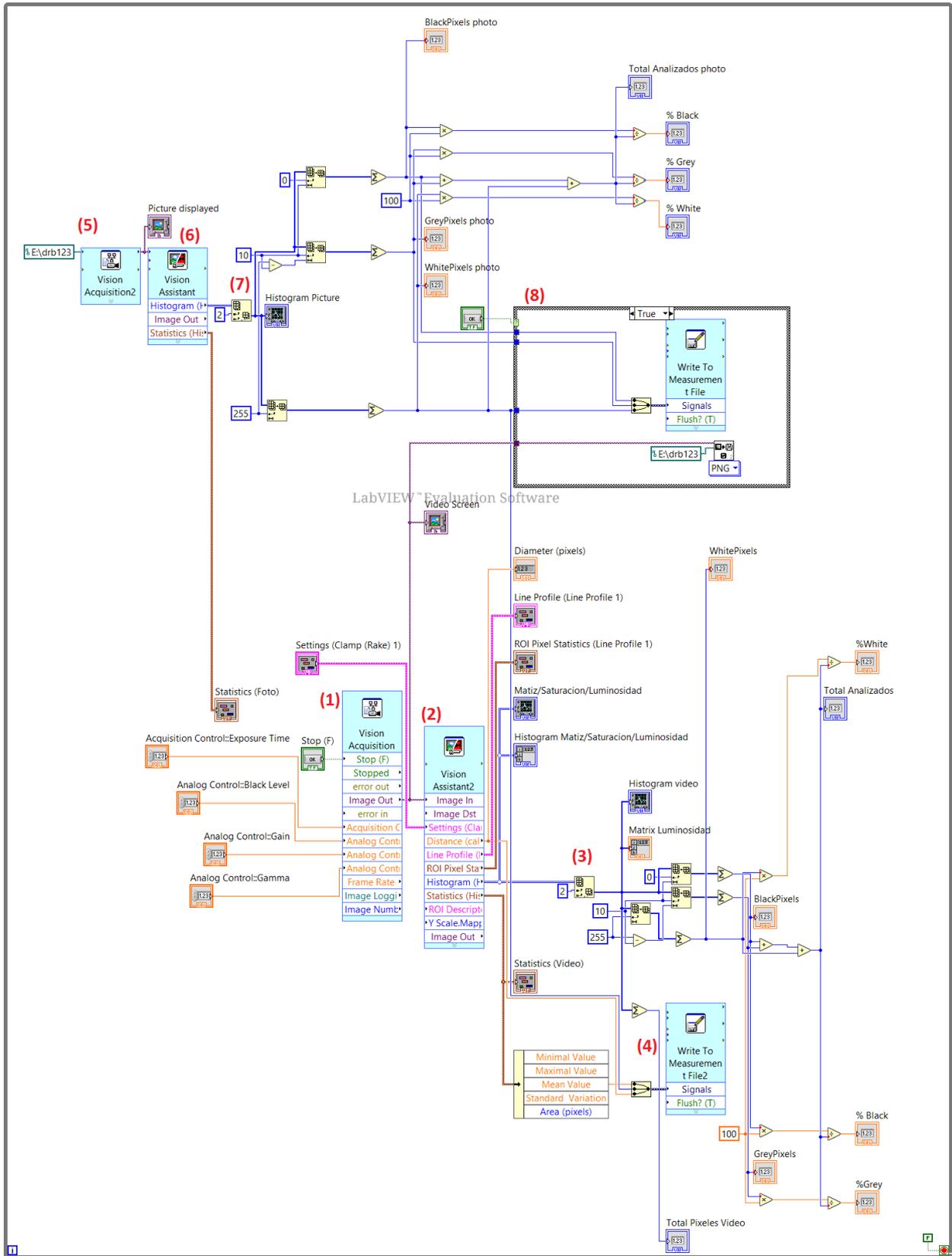


Figura 69: Diagrama de bloques del software diseñado en LabVIEW

- (1) **Vision Acquisition.** Es el punto de partida de la ejecución del programa. Tras haber configurado la cámara previamente, este primer bloque permite adquirir, visualizar y guardar imágenes capturadas en tiempo real. Guarda una captura en cada iteración del bucle. Además, permite al usuario configurar en cada momento algunos de los parámetros analógicos fundamentales de la cámara: el tiempo de exposición, la ganancia, el nivel de negros y la corrección gamma (luminancia para sistemas de imagen).
- (2) **Vision Assistant2.** A continuación, esta imagen pasa por esta herramienta, donde será tratada. Vision Assistant permite al usuario aplicarle filtros a la imagen, ediciones programadas, etc. Previamente a ejecutar el programa, se pueden modificar estos parámetros y, tal y como se puede apreciar en el diagrama de bloques, mostrar estos resultados por pantalla como se muestra en los hilos saliente de este bloque (parte derecha). Algunas estadísticas, histogramas, filtros e incluso matrices salen de este bloque en cada iteración del bucle. De este bloque cuelga un hilo con la herramienta necesaria para mostrar por pantalla del interfaz la toma de fotogramas a tiempo real.
- (3) **Operaciones con datos del histograma (video).** Las operaciones que se muestran en esta parte corresponden al tratamiento de datos realizado con el histograma extraído del paso anterior. Donde viene una cadena de valores correspondientes al número de píxeles que se asocian a cada valor entre 0 y 255 de la imagen para los distintos atributos de color: Matiz, Saturación y Luminosidad. Donde Matiz hace referencia al color, Saturación al grado de intensidad y Luminosidad, que es con el que trabajamos, hace referencia a la claridad del color. Una serie de operación y sumatorios, permiten mostrarnos por pantalla cuántos píxeles negros, blancos y grises tenemos en las imágenes a tiempo real, a la vez que se calcula el porcentaje que representan.
- (4) **Archivo Excel.** En esta parte se juntan los datos extraídos en los pasos (2) y (3) para conformar un fichero Excel. Éste almacena en 3 columnas, por cada iteración de bucle, valores de: media del valor de los píxeles por imagen, número total de píxeles blancos y el diámetro del spot (que es una de las mejoras propuestas durante el proyecto). A este archivo se le puede nombrar como se quiera y se almacena en la carpeta de archivos LabVIEW.
- (5) **Vision Acquisition2.** Permite hacer lo mismo que (1), pero con la captura manual de imágenes tomada por el usuario. En el interfaz de usuario, se mostrará por pantalla únicamente la última imagen capturada, aunque las anteriores se almacenen. Explicado en paso (8).
- (6) **Vision Assistant.** Al igual que (2), este bloque permite el tratamiento con las imágenes capturadas. No obstante, lo único que resultaba ser de interés son sus estadísticas, así como su histograma.
- (7) **Operaciones con datos del histograma (imagen).** Al igual que (3), pero para la imagen capturada. Esto permite al usuario comparar a tiempo real los valores del vídeo, con los de la última imagen capturada.
- (8) **True/False.** Esta última ventana solamente se activa cuando el usuario presiona el botón de capturar una imagen. El programa entra en esta opción, guarda la foto tomada en un fichero .png y almacena en un fichero Excel los píxeles de cada color: negro (valores entre 0 y 9), blanco (valor 255) y gris (valores entre 10 y 254).

Procesos de fabricación de las microlentes de hidrogel

A continuación, se desglosa paso a paso y se expone de manera detallada, el modelo seguido para la elaboración y fabricación de las microlentes de hidrogel que se han estado utilizando durante el proyecto: D-TEA, D-1/2 BSA y M. Este proceso, se compone de 2 etapas: la primera la cual consiste en la silanización de los chips, y la segunda, se basa en la propia síntesis de las microlentes sobre este chip previamente fabricado.

Etapa 1: Silanización de los chips.

- 1- Lavar con etanol (EtOH) los chips minuciosamente y secar con aire comprimido.
- 2- Sobre los chips lavados y secos se realiza una limpieza con plasma de oxígeno durante 3 mins.
- 3- Tras sacar del plasma los chips, se vuelven a lavar con EtOH y secar con aire comprimido.
- 4- Una vez lavados los chips, se mide el ángulo de contacto depositada en la superficie y debe de dar como resultado el ángulo $\approx 0^\circ$.
- 5- Cuando se ha comprobado que el ángulo de contacto es ≈ 0 , los chips se dejan durante 4h a temperatura ambiente en disolución de organoalcoxisilanos como R-Si (OEt) 3 en Tolueno al 4% V/V.
- 6- Tras las 2h en disolución, lavamos exhaustivamente los chips con acetona, secamos con aire comprimido y se llevan a estufa de 80°C durante 30 minutos.
- 7- Transcurrido dicho tiempo, se vuelven a lavar con EtOH, se secan y se mide el ángulo de contacto de su superficie y debe dar como resultado $\geq 90^\circ$.

Etapa 2: Síntesis de las gotas de hidrogel sobre chip previamente silanizado.

- 1- Los volúmenes de hidrogel depositados sobre el chip silanizado fueron de 3.5, 5 y 8 μl .
- 2- Una vez depositadas las gotas, se realiza su fotopolimerización durante 7 mins con una lámpara de luz UV (254 nm).
- 3- El Hidrogel D con TEA, los 300 μl de glicerol se cambian por 300 μl de TEA (1M).

En la siguiente Tabla 1 se muestran los nombres de las muestras de hidrogeles elaborados para el proyecto, así como sus concentraciones.

Nombre muestra	AAm (mg)	MBA (mg)	MPC (mg)	H ₂ O (mL)	Li (mg)		
M	190	15,6	41,5	1	4		
	AAm (mg)	MBA (mg)	BSA (μL)	Glycerol (μL)	Tween (μL)	PBS1X (μL)	Li (mg)
D ½ BSA	380	8	150	300	-	559,4	4
D con TEA	380	8	300	300	-	559,4	4

Tabla 2: Composición de las gotas llevadas a análisis