

FACULTAD DE CIENCIAS
GRADO EN FÍSICA
TRABAJO FIN DE GRADO
CURSO ACADÉMICO [2021-2022]

TÍTULO:

**CARACTERIZACIÓN ÓPTICA DE UN MODULADOR ESPACIAL DE LUZ DE
CRISTAL LÍQUIDO MEDIANTE POLARIMETRÍA DE IMAGEN**

AUTOR:

ADRIÁN MOYA ALIAGA

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a todos aquellos que me han ayudado a lo largo de esta etapa y han colaborado en esta investigación.

En primer lugar, a mi tutor el Dr. Víctor Navarro Fuster y al Dr. Andrés Márquez Ruiz por su ayuda en la planificación, información y organización en este trabajo de Fin de Grado. Además, también han sido de gran ayuda la doctorando Adriana Rosalía Sánchez y el Dr. Francisco Javier Martínez Guardiola.

En segundo lugar, a mi familia por haberme dado la oportunidad de estudiar con la tranquilidad de que siempre tengo todo su apoyo.

También agradecer a la Universidad de Alicante por todas las facilidades prestadas para llevar a cabo el desarrollo de este trabajo.

Llevar a cabo este estudio ha sido una gran experiencia que me ha ayudado a decidir la dirección que me gustaría tomar en mis estudios.

Resumen

En este Trabajo de Fin de Grado se ha hecho un estudio y análisis de unos dispositivos capaces de controlar localmente y en tiempo real las propiedades características de un frente de ondas, como pueden ser la amplitud, la fase y la polarización de la propia luz del haz. Un tipo de dispositivos que permiten realizar todo esto son la micropantallas de cristal líquido en silicio (LCoS, Liquid Crystal on Silicon). Pero antes de usar estos dispositivos es importante conocer como se comportan ante distintas situaciones y entornos. Por ello, con el objetivo de poder usar estos dispositivos eficientemente se hace necesario calibrar sus propiedades ópticas en función de los voltajes que se le envían. Hasta ahora, existen una gran variedad de técnicas de calibrado, pero, en general, no se basan en polarimetría para calibrar simultáneamente los millones de píxeles que forman la pantalla del LCoS. Es por esta razón, que en este TFG se presenta una técnica de calibrado basada en la polarimetría de Stokes. Originalmente, esta técnica se ha usado con éxito para calibrar puntos aislados de la pantalla de cristal líquido, que es lo que hacen la mayoría de técnicas de calibrado. En este trabajo, se ha extendido esta técnica a toda la pantalla, y para ello, se ha tenido que trabajar con imágenes del LCoS. Este tipo de técnicas se conocen como polarimetría de imagen.

Para realizar este trabajo se ha diseñado un experimento mediante el cual, gracias al entorno de programación LabView, se ha automatizado el proceso de la toma de las imágenes, y luego, con el entorno MatLab, se ha trabajado y analizado estas imágenes para extraer los parámetros ópticos que permiten calibrar una micropantalla de cristal líquido. Estos parámetros que se han estudiado en función de los niveles de gris (el voltaje enviado a la pantalla) son los parámetros de Stokes, el retardo lineal, la orientación del director y el flicker. En un principio, este análisis se ha realizado de forma simultánea en tres píxeles de la cámara distintos, para luego expandirlo y analizar, por ejemplo, el retardo lineal en un rango de píxeles. Además, tras haber realizado el calibrado, se ha podido predecir el estado de polarización de la luz.

Por lo tanto, con este TFG, se ha realizado una calibración de una micropantalla LCoS con un nivel de incertidumbre lo suficientemente bajo como para que se pueda predecir el comportamiento de la pantalla para otros estados de polarización incidentes. De este modo, la micropantalla se consigue preparar para ser usada en aplicaciones de modulación del frente de onda. Existe una gran variedad de errores y ruido experimental que se han ido presentando a lo largo del desarrollo del trabajo. Además, se ha verificado a través de los resultados alcanzados que el comportamiento del LCoS caracterizada es bastante homogéneo a lo largo de su superficie. De forma general, se ha demostrado una metodo-

logía muy interesante para optimizar el funcionamiento de los LCoS en un gran número de aplicaciones presentes y futuras.

Abstract

In this Final Degree Project, a study and analysis of devices capable of controlling locally and in real time the characteristic properties of a wavefront, such as the amplitude, phase and polarization of the light of the beam itself, has been carried out. One type of device that allows all of this to be done is Liquid Crystal on Silicon (LCoS) microdisplays. But before using these devices it is important to know how they behave in different situations and environments. Therefore, in order to be able to use these devices efficiently, it is necessary to calibrate their optical properties based on the voltages that are sent to them. Until now, there are a wide variety of calibration techniques, but, in general, they do not rely on polarimetry to simultaneously calibrate the millions of pixels that make up the LCoS screen. It is for this reason that in this TFG a calibration technique based on Stokes polarimetry is presented. Originally, this technique has been used successfully to calibrate isolated points on the liquid crystal display, which is what most calibration techniques do. In this work, this technique has been extended to the entire screen, and for this, it has had to work with LCoS images. These types of techniques are known as image polarimetry.

To carry out this work, an experiment has been designed through which, thanks to the LabView programming environment, the process of taking the images has been automated, and then, with the MatLab environment, worked and analyzed these images to extract the optical parameters that allow to calibrate a liquid crystal microdisplay.

These parameters that have been studied as a function of gray levels (the voltage sent to the screen) are the Stokes parameters, the average retardance, the director orientation and the flicker. Initially, this analysis was performed simultaneously on three different camera pixels, then expanded to analyze, for example, the average retardance over a range of pixels. In addition, after having performed the calibration, it has been possible to predict the polarization state of the light.

Therefore, with this TFG, a calibration of an LCoS microdisplay has been performed with a level of uncertainty low enough to predict the behavior of the screen for other incident polarization states. In this way, the microdisplay is prepared to be used in wavefront modulation applications. There is a great variety of errors and experimental noise that have been presented throughout the development of the work. In addition, it has been verified through the results achieved that the behavior of the characterized LCoS is quite homogeneous along its surface. In general, a very interesting methodology has been demonstrated to optimize the operation of LCoS in a large number of present and future applications.

Índice

1. Introducción	11
1.1. Luz Polarizada	11
1.1.1. Polarizador Lineal	13
1.1.2. Laminas Retardadoras	14
1.2. Parámetros de Stokes	14
1.3. Matrices de Mueller	16
1.4. Cristales Líquidos	17
1.5. Antecedentes y Objetivos	22
2. Metodología y Materiales	25
2.1. Teoría	25
2.1.1. <i>Cross-Talk</i>	29
2.1.2. <i>Flicker</i>	29
2.2. Montaje Experimental:	31
3. Resultados	35
4. Conclusión	56
5. Anexo	58
5.1. Programa para el análisis de las imágenes:	58
5.2. Automatización de la toma de medidas mediante programación en entorno LabView:	63
5.3. Errores de las medidas asociados a la cámara y el LCoS	65
5.4. Matriz de reflexión asociada al dispositivo LCoS	67
Referencias	69

1. Introducción

Los campos de la óptica y la fotónica se han visto revolucionados por la aparición de dispositivos capaces de modificar en tiempo real diversas propiedades de los haces de luz. Entre todos ellos, destacan las micropantallas de cristal líquido sobre silicio (LCoS, *Liquid Crystal on Silicon microdisplays*). Este tipo de dispositivos, gracias a las propiedades dieléctricas y anisótropas de las moléculas de cristal líquido (LC, *Liquid Crystal*) y la aplicación de un voltaje entre las dos caras del dispositivo, son capaces de cambiar las propiedades del haz de luz que lo atraviesa.

Algunas de las aplicaciones avanzadas de óptica y fotónica que utilizan esta tecnología son, por ejemplo, las pinzas ópticas. Gracias al uso de dispositivos de cristal líquido, son capaces de concentrar el frente de onda del haz láser en un punto concreto, y así generar una fuerza atractiva o repulsiva para sostener y mover cuerpos dieléctricos microscópicos. Otra aplicación es en óptica adaptativa, por ejemplo, donde los dispositivos de cristal líquido se utilizan para emular el comportamiento de una atmósfera, como si se tratase de un medio inhomogéneo no absorbente que solo varía la fase de las ondas que lo atraviesa. Existen muchas más aplicaciones en diferentes campos como almacenamiento holográfico de datos, conformación de haces, interconectores reconfigurables en comunicaciones ópticas, entre otras cosas [5].

Para poder controlar estos dispositivos con precisión, es necesario calibrar sus propiedades en función de los voltajes aplicados. Para ello, en este trabajo se va a presentar una novedosa técnica de polarimetría de imagen basada en la polarimetría de Stokes. En este apartado, vamos a dar una pequeña introducción teórica sobre la luz polarizada y los elementos que nos permiten trabajar con la polarización. También vamos a explicar la polarimetría de Stokes y qué son los cristales líquidos.

1.1. Luz Polarizada

Según el modelo de Maxwell, la luz se puede considerar como una onda electromagnética transversal, con una componente perteneciente al campo eléctrico \vec{E} , y otra que corresponde al campo magnético \vec{B} , que oscilan sinusoidalmente y son ortogonales. A la hora de estudiar la propagación de la luz, es suficiente con considerar el campo eléctrico, ya que se puede relacionar fácilmente con el campo magnético.

El estado de polarización nos indica las orientaciones con las que puede oscilar las ondas electromagnéticas. En general, cualquier haz de luz se puede describir como la superposi-

ción de dos ondas perpendiculares entre sí:

$$\vec{E} = \vec{E}_x + \vec{E}_y \quad (1)$$

donde $E_x = \hat{i}E_{0x}\cos(kz - \omega t)$ y $E_y = \hat{j}E_{0y}\cos(kz - \omega t + \varphi)$. Ambas ondas viajan en el sentido positivo de la dirección z y φ es la diferencia de fase relativa entre ambas.

Estas dos componentes son capaces de generar todas las formas de luz polarizada. Principalmente, se distinguen tres tipos de luz polarizada:

- **Luz linealmente polarizada.** Tiene lugar cuando $\varphi = \pm m\pi$ con $m = 0, 1, 2, \dots$

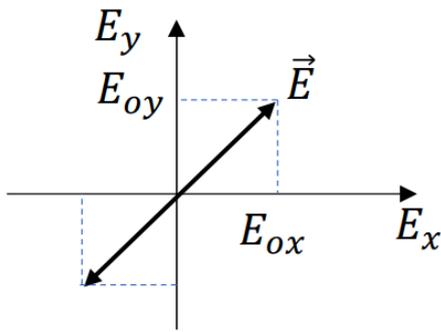


Figura 1: Luz linealmente polarizada con pendiente positiva (m es 0 ó un n^o par). [1]

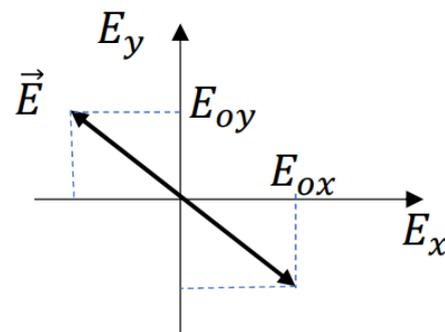


Figura 2: Luz linealmente polarizada con pendiente negativa (m es un n^o impar).[1]

- **Luz circularmente polarizada.** Tiene lugar cuando $\varphi = \pm\frac{\pi}{2} + 2m\pi$ con $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ y las amplitudes E_{0x} y E_{0y} son iguales.

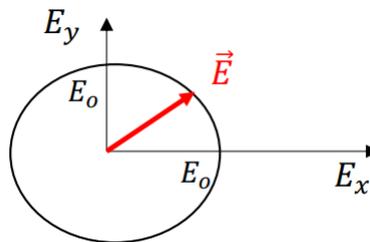


Figura 3: Luz circularmente polarizada.[2]

Si el $\pm\frac{\pi}{2}$ es positivo, la luz es circular levógira (sentido de giro del campo eléctrico antihorario), y si es negativo es luz circular dextrógira (sentido horario).

- **Luz elípticamente polarizada.** Tiene lugar cuando $\varphi = \pm\frac{\pi}{2} + m\pi$ con $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ y las amplitudes E_{0x} y E_{0y} son diferentes.

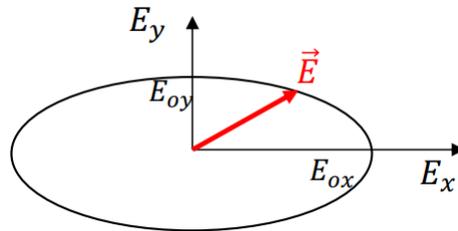


Figura 4: Luz elípticamente polarizada.[2]

El criterio de giro del campo eléctrico es el mismo que el de la luz circularmente polarizada.

La luz se puede polarizar de formas muy diversas. Una de las formas de hacerlo, es hacer que atraviese elementos ópticos especiales que pueden manipular el estado de polarización. Los más comunes son el polarizador lineal y las láminas retardadoras [2].

1.1.1. Polarizador Lineal

Los polarizadores lineales (ver Figura 5) están fabricados de un material capaz de absorber la luz polarizada en una dirección específica. Esta dirección se conoce como eje de extinción, y la luz que sale del material está linealmente polarizada en la dirección perpendicular al eje de extinción, lo que se conoce como eje de transmisión. El eje de transmisión se puede rotar a lo largo de una escala graduada en grados de tal forma, que si se configura a 0° , el eje de transmisión coincide con la vertical del laboratorio.

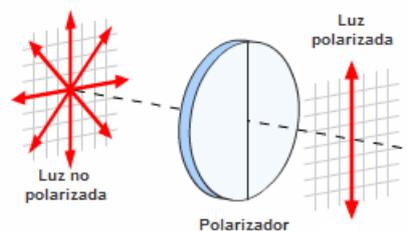


Figura 5: Polarizador Lineal.[3]

Es importante destacar, que si se ponen dos polarizadores con ejes cruzados a lo largo de un eje óptico, se obtiene una absorción total de la luz.

1.1.2. Láminas Retardadoras

Este elemento óptico se fabrica con un material birrefringente uniaxial. Cuando se hace pasar la luz por este dispositivo, cada una de las componentes del campo eléctrico tiene una velocidad de propagación distinta, lo que provoca que una de las componentes se retrase respecto a la otra. Este retraso depende de la diferencia entre los índices de refracción y el grosor del material. Este efecto provoca un cambio en el estado de polarización de la luz incidente. Por ejemplo, una lámina retardadora $\lambda/4$ (ver Figura 6) introduce un desfase relativo de $\pi/2$ entre las componentes ortogonales.

En general, en una lámina retardadora tenemos un eje rápido y un eje lento, que son perpendiculares entre ellos, y se conocen como líneas neutras. Las láminas retardadoras que se suelen utilizar en los laboratorios, permiten rotar las líneas neutras respecto a un eje perpendicular a lo largo de una escala graduada en grados, de tal forma que si se pone a 0° , el eje rápido coincide con el eje vertical del laboratorio. El cómo introducen el desfase ó retardo entre las componentes de los campos eléctricos que la atraviesan es muy similar a cómo lo hacen las moléculas de cristal líquido, por lo que lo explicaremos en detalle en los próximos apartados.

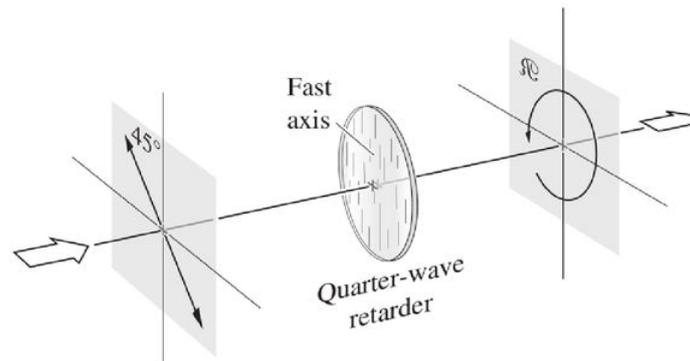


Figura 6: Lámina Retardadora $\lambda/4$. Tal y como hemos dicho, si se introduce un desfase relativo de $\pi/2$ en la luz linealmente polarizada, se obtiene luz circularmente polarizada levógira ó dextrógira.[4]

1.2. Parámetros de Stokes

En 1852 G. G. Stokes presentó una nueva descripción de la polarización en términos de cuatro cantidades que son funciones de la irradiancia de la onda electromagnética. Estas cantidades se conocen como parámetros de Stokes. Por lo tanto, el estado de polarización

de un haz de luz se puede describir solamente mediante estos cuatro parámetros.

Para entender el funcionamiento de estos parámetros vamos a suponer que colocamos cuatro filtros en la trayectoria del haz, donde el primero es isótropo, el segundo y el tercero son polarizadores lineales con ejes de transmisión horizontal y a $+45^\circ$ respectivamente, y el cuarto es un polarizador circular. Entonces se miden las irradiancias transmitidas por cada filtro con un medidor insensible a la polarización (I_0, I_1, I_2 y I_3). Por tanto, los parámetros de Stokes se pueden definir como: [1]

$$S_0 = 2I_0 \quad (2)$$

$$S_1 = 2I_1 - 2I_0 \quad (3)$$

$$S_2 = 2I_2 - 2I_0 \quad (4)$$

$$S_3 = 2I_3 - 2I_0 \quad (5)$$

El parámetro S_0 es la irradiancia incidente, mientras que S_1, S_2 y S_3 describen el estado de polarización del haz incidente. Veamos que significan estos tres parámetros:

- S_1 indica la tendencia que tiene la polarización para parecerse a luz linealmente polarizada horizontal ($S_1 > 0$) o vertical ($S_1 < 0$). Cuando $S_1 = 0$ el haz puede ser elíptico a $\pm 45^\circ$, circular o no polarizado.
- S_2 indica la tendencia de la luz a parecer luz linealmente polarizada a $+45^\circ$ ($S_2 > 0$) ó -45° ($S_2 < 0$) ó ninguna de estas dos direcciones ($S_2 = 0$).
- S_3 indica la tendencia a que la luz polarizada sea dextrógira ($S_3 > 0$) ó levógira ($S_3 < 0$) ó ninguna de las dos ($S_3 = 0$).

Los parámetros de Stokes se pueden reescribir en función del campo eléctrico partiendo de la definición de luz monocromática que hemos hecho en (1).

$$S_0 = E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \quad (6)$$

$$S_1 = E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \quad (7)$$

$$S_2 = 2E_{0x}E_{0y}\cos\varphi \quad (8)$$

$$S_3 = 2E_{0x}E_{0y}\sen\varphi \quad (9)$$

Estos parámetros se suelen presentar como un vector, conocido como vector de Stokes:

$$S = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad (10)$$

Por lo tanto, los principales estados de polarización se pueden expresar en función del vector de Stokes:

Estado de Polarización	Vector de Stokes	Estado de Polarización	Vector de Stokes
Lineal Horizontal	$\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	Lineal Vertical	$\begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$
Lineal a $+45^\circ$	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$	Lineal a -45°	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$
Circular Dextrógira	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$	Circular Levógira	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}$

Figura 7: Principales estados de polarización.[2]

1.3. Matrices de Mueller

En 1943, Hans Mueller desarrolló un método de matrices que permitían trabajar con los vectores de Stokes. La idea consistía en asociar a los distintos elementos ópticos matrices de 4×4 . Entonces, se puede deducir la polarización que va a presentar la luz tras pasar por diversos elementos ópticos mediante un producto de matrices de la siguiente forma:

$$S_t = A_n \dots A_2 \cdot A_1 \cdot S_i \quad (11)$$

donde S_i es la luz incidente, S_t la de salida y las A son las matrices de Mueller correspondientes a elementos ópticos. En la Figura 8 se muestran las matrices de Mueller asociadas a los principales elementos ópticos de polarización.

Elemento óptico	Matriz de Mueller	Elemento óptico	Matriz de Mueller
Polarizador lineal horizontal	$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	Polarizador lineal vertical	$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
Polarizador lineal a +45°	$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	Polarizador lineal a -45°	$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
Lámina $\lambda/4$ eje rápido horizontal	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$	Lámina $\lambda/4$ eje rápido vertical	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$

Figura 8: Matrices de Mueller asociadas a los principales elementos ópticos de polarización.[2]

1.4. Cristales Líquidos

En 1888, Friedrich Reinitzer descubrió una nueva fase de la materia que poseía propiedades comprendidas entre los líquidos y sólidos. Los cristales líquidos tienen moléculas largas (ver Figura 9) que pueden moverse en su entorno y carecen de orden posicional, pero el conjunto de moléculas interactúan intensamente entre sí para mantener un orden de orientación a gran escala.

Dependiendo de como estén alineadas las moléculas LC, se distinguen varios tipos de cristal líquido. Sin embargo, en este trabajo nos vamos a centrar en la variedad nemática, en la que las moléculas LC tienden a ser más o menos paralelas entre ellas.

Para obtener una celda nemática paralela, lo que se hace es recubrir una de las caras de dos piezas de vidrio plano con una película metálica transparente y conductora (hecha de una composición de óxido de indio y estaño, ITO). Estas dos piezas cumplen la función de electrodos, entre las cuales se introduce el cristal líquido. Es interesante que las moléculas LC en contacto con las dos piezas tengan una dirección paralela al vidrio y que también sean paralelas entre ellas (tal y como indica la Figura 10). Para ello, se aplica sobre los electrodos de ITO una capa de alineado, que presenta una orientación preferencial de adsorción a lo largo de la cual se alinean las moléculas de cristal líquido.

Por lo tanto, se rellena el espacio entre las dos piezas con cristal líquido nemático, y las moléculas que entran en contacto con esta capa de alineado quedan con sus ejes en una

dirección definida. Entonces, lo que ocurre es que el resto de las moléculas LC, por interacciones intermoleculares, quedan alineadas y orientadas en la misma dirección que las moléculas de los bordes, que están en contacto con las capas de alineado. Esta dirección se denomina director y acostumbra a coincidir con el eje extraordinario de las moléculas LC.

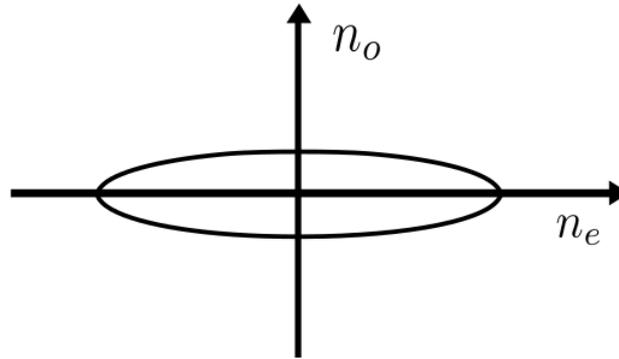


Figura 9: Molécula de cristal líquido en la cual $n_e > n_o$, que es el caso más habitual. El eje vertical se conoce como eje ordinario ó eje corto/eje rápido, y en esta dirección la luz se propaga por un índice de refracción n_o . La dirección horizontal es el eje extraordinario ó eje largo/eje lento, y hay un índice de refracción n_e distinto de n_o , por lo que la luz se propaga a velocidades distintas en función de si el campo eléctrico vibra a lo largo del eje ordinario o del extraordinario. Por lo tanto, una molécula LC (Liquid Crystal) sería análoga a un medio birrefringente.

Hay que tener en cuenta que cuando la luz se desplaza por un medio birrefringente, experimenta distintos cambios de fase en función de si el campo eléctrico vibra en la dirección extraordinaria o en la ordinaria. La diferencia entre estos cambios de fase se conoce como retardo. En el caso de una molécula LC, se define la fase de la onda para su componente extraordinaria y ordinaria como:

$$\varphi_o = \frac{2\pi}{\lambda} \delta_o \quad (12)$$

$$\varphi_e = \frac{2\pi}{\lambda} \delta_e \quad (13)$$

donde λ es la longitud de onda de la luz incidente y δ_o , δ_e es el camino óptico ordinario y extraordinario, respectivamente.

Entonces, sabiendo que $\delta = d \cdot n$, el retardo Γ se define como:

$$\Gamma = \Delta\varphi = \varphi_e - \varphi_o = \frac{2\pi}{\lambda} d(n_e - n_o) \quad (14)$$

donde d es el grosor de la celda que contiene a las moléculas LC. El retardo Γ , como veremos más adelante, depende del voltaje aplicado al cristal líquido, es decir, $\Gamma(V)$.

Por lo tanto, si se hace pasar, por ejemplo, un haz de luz cuyo frente de onda es linealmente polarizado y paralelo al eje director del cristal líquido, solamente experimentará un cambio de fase a medida que atraviesa la celda de cristal líquido sin cambiar su estado de polarización. En cambio, si el haz linealmente polarizado está inclinado 45° respecto el director, lo que ocurre es que el haz se puede dividir en una componente ordinaria y una extraordinaria, por lo que teniendo en cuenta la expresión (14), el haz sufrirá un cierto retardo, como si el haz hubiera atravesado un cristal birrefringente.

Una propiedad importante de las moléculas de cristal líquido es que su orientación depende del voltaje, es decir, las moléculas de cristal líquido, al someterlas a un campo eléctrico, se reorientan de tal forma que el eje extraordinario apunte en la misma dirección que el campo eléctrico. Esto es debido a que las moléculas de cristal líquido nemático se comportan como dipolos inducidos y, por tanto, surge sobre ellas un torque dipolar eléctrico. Aprovechando esta propiedad, lo que se hace, es aplicar un determinado voltaje a lo largo de la celda, generando un campo eléctrico perpendicular a las caras de las celdas de ITO, provocando que las moléculas sufran un torque (excepto las moléculas LC de los bordes) de tal forma que intenten alinearse con el campo eléctrico. Sin embargo, este movimiento no es instantáneo, sino que se realiza poco a poco a medida que se aumenta el voltaje, hasta llegar un punto en que las moléculas de cristal líquido están totalmente alineadas con el campo eléctrico (ver Figura 10). A medida que realizan este movimiento, disminuye la birrefringencia y, por tanto, disminuye el retardo para la luz que incide perpendicularmente a las caras de la celda.

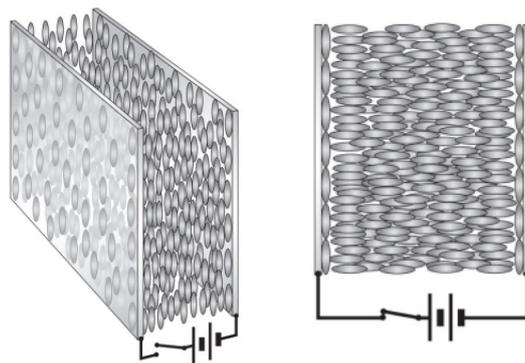


Figura 10: (Izquierda) Celda de cristal líquido nemática cuando no se aplica un voltaje entre sus caras. (Derecha) Celda de cristal líquido nemática cuando se aplica un voltaje lo suficientemente alto como para que todas las moléculas LC se alineen con el campo eléctrico.[1]

Por lo tanto, dependiendo de como incida la luz, se puede usar la celda de cristal líquido de distintas formas. Por ejemplo, si incide la luz polarizada linealmente a lo largo del eje extraordinario, el dispositivo se puede utilizar como un modulador de fase. Si la luz se puede descomponer en componentes extraordinaria y ordinaria, el dispositivo se puede usar como un retardador variable, ó si se coloca la celda entre polarizadores cruzados a $\pm 45^\circ$, es un modulador de irradiancia. En general, a los cristales líquidos capaces de modificar espacialmente la modulación de un haz de luz se llaman SLM (*Spatial Light Modulator*).

Por último, destacar que uno de los usos más comunes del cristal líquido son las pantallas de cristal líquido LCD (*Liquid Crystal Display*). En general, un dispositivo LCD es de la siguiente forma:

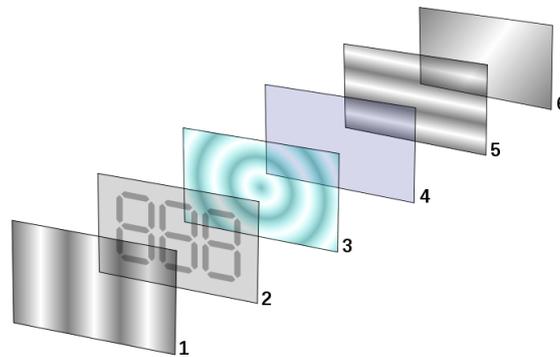


Figura 11: *Dispositivo LCD.*[26]

Veamos un poco sus componentes para un dispositivo LCD de reflexión que modula la irradiancia:

1. Polarizador lineal.
2. Sustrato de vidrio con electrodos (ITO, típicamente).
3. Cristal líquido entre dos capas de alineado giradas entre sí 90° , en la configuración conocida como nemática helicoidal (TN, *twisted nematic*) y que mostramos en la Figura 12.
4. Sustrato de vidrio con electrodos (ITO, típicamente).

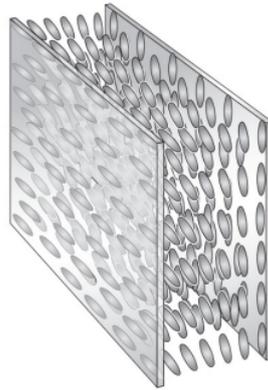


Figura 12: Una celda *Twisted Nematic*.^[1]

5. Polarizador lineal con su eje de transmisión cruzado respecto el polarizador 1, para permitir o bloquear el paso de la luz, dependiendo del voltaje que se aplique al cristal líquido.
6. Superficie reflectante que hace que la luz vuelva al observador.

Este sistema permite controlar la luz que sale de la LCD en intensidad (irradiancia). En este trabajo, nos vamos a centrar en el estudio de una variación de estos LCD, conocido como Cristal Líquido sobre Silicio (LCoS: Liquid Crystal on Silicon). Estos dispositivos, en general, consisten en una "micropantalla" que está compuesta por una capa de cristal líquido sobre la parte superior de una placa de silicio, y que posee una superficie reflectante. A nivel óptico y fotónico, la función de las LCD y LCoS es exactamente el mismo, y su principal diferencia se encuentra en la tecnología¹ para construirlos. En concreto, el LCoS utiliza tecnología de control CMOS.

¹Se utiliza la misma tecnología empleada en la fabricación de *chips* y memorias *RAM* de los ordenadores.

El dispositivo LCoS que vamos a utilizar en este Trabajo de Final de Grado posee la siguiente estructura:

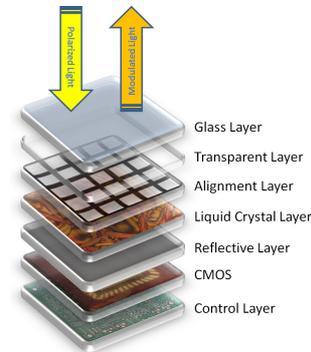


Figura 13: Estructura característica de un dispositivo PA-LCoS.[23]

En general, tenemos una capa de vidrio de protección seguida del electrodo ITO. La capa de cristal líquido está entre dos capas de alineado, y debajo tenemos la superficie reflectante (de aluminio). En la parte posterior del dispositivo, tenemos el circuito CMOS encargado de controlar las funciones eléctricas y ópticas

1.5. Antecedentes y Objetivos

Recientemente, las pantallas de cristal líquido sobre silicio (LCoS) han adquirido una gran utilidad en los campos de la óptica y la fotónica [5] debido a su gran resolución espacial, un tamaño pequeño de píxeles y su capacidad de producir solamente modulación de fase² [6, 7]. Gracias a como están diseñados estos dispositivos, presentan un rango mayor a la hora de modular la fase que los dispositivos LCD del mismo grosor, lo cual es muy importante en, por ejemplo, aplicaciones ópticas difractivas, ya que permite alcanzar mayor eficiencia [8].

A pesar de todas estas propiedades, las moléculas de cristal líquido no se quedan completamente quietas para un cierto periodo de tiempo, sino que fluctúan con el tiempo. Esto genera efectos no deseados como puede ser la despolarización [9, 10], la existencia del *flicker* [11, 12], respuesta espacial no uniforme [13], efectos *Cross-Talk* entre píxeles y efectos entre moléculas LC vecinas [14]. Estos efectos los veremos en detalle más adelante. El problema de la despolarización se puede minimizar con un tipo de LCoS llamado *Parallel Aligned* (PA) LCoS. Sin embargo, el resto de problemas siguen presentes.

²Consiste en modificar la fase del frente de ondas localmente.

Por lo tanto, debido a las limitaciones físicas internas y de construcción, a la hora de calibrar la PA-LCoS, se necesita caracterizar, por un lado, la variación del retardo lineal con el voltaje, y, por otro lado, las consecuencias que tienen todos estos efectos negativos que hemos comentado sobre las propiedades de nuestro dispositivo. Actualmente, se pueden diferenciar tres técnicas de calibrado: interferométricas, difractivas [15, 16] y polarimétricas. Esta última técnica de caracterización, en comparación con las otras dos, suele ser un método más simple y rápido, que normalmente se basa en una expresión analítica no muy compleja.

A lo largo de los últimos años, se han ideado diversas técnicas polarimétricas. Una de ellas consiste en utilizar las matrices de Mueller [17], que permite realizar una buena caracterización espacial local, pero el montaje necesario es bastante complejo. Otra opción que requiere un montaje más simple, es la obtención del *flicker* para determinados valores del retardo utilizando un polarímetro lineal extendido, pero este método es más limitado que el anterior [18]. Otro método analítico consiste en utilizar la polarimetría de Stokes, que permite calcular el retardo lineal y el *flicker* en función del voltaje [19, 20]. Un siguiente modelo basado en esta idea, permitió calcular el ángulo de inclinación de las moléculas LC y sus fluctuaciones [21]. Con todos estos parámetros, se pudo comenzar a predecir el retardo lineal y el *flicker* para todo el rango visible del espectro, y para un ángulo de incidencia de 0 a 45°[22].

En este TFG, nos vamos a centrar en un método basado en técnicas polarimétricas, en concreto, en el método que utiliza la polarimetría de Stokes [22]. Hasta ahora, este método solamente se ha utilizado para estudiar un solo punto aislado del LCoS, pero para poder utilizar de forma óptima este tipo de dispositivos en aplicaciones avanzadas ópticas y fotónicas, es importante mejorar este método. Por ejemplo, si se tiene un frente de ondas, la variación de las propiedades a lo largo del mismo puede introducir aberraciones no deseadas, con lo cual, se hace necesario el estudio a nivel de imagen de las propiedades del dispositivo. Por lo tanto, el principal objetivo de este trabajo, es ser capaces de realizar una calibración precisa de las propiedades ópticas de una micropantalla PA-LCoS en función de los voltajes enviados. Para ello, vamos a utilizar una nueva técnica de polarimetría de imagen, que nos va a permitir estudiar las propiedades ópticas a nivel local de forma simultánea para todos los píxeles que conforman la micropantalla.

2. Metodología y Materiales

En este apartado vamos a desarrollar matemáticamente el modelo de polarimetría de Stokes en el que nos basamos para realizar la calibración del dispositivo LCoS, y, en segundo lugar, vamos a explicar el montaje experimental que hemos utilizado para realizar este trabajo.

2.1. Teoría

Como ya hemos dicho en el apartado anterior, nos vamos a basar en una técnica de polarimetría de Stokes [22] que nos va a permitir caracterizar el retardo lineal, el *flicker* y la orientación del director del cristal líquido en función del voltaje aplicado. El método que usamos es analítico, y en general, es aplicable a cualquier dispositivo de reflexión LC-SLM. En nuestro caso, lo vamos a utilizar en un dispositivo PA-LCoS, lo que nos va a permitir realizar una caracterización bastante precisa y, por tanto, predecir el comportamiento del dispositivo para distintas aplicaciones. Además, destacar que una novedad de este método respecto a versiones anteriores, es la capacidad de medir el director del LC, y concretamente, sus variaciones con el voltaje aplicado, lo cual nos da una idea del giro residual que pueden sufrir las moléculas LC, y esto nos da un mayor entendimiento de los procesos físicos que tienen lugar en este tipo de moléculas.

Para realizar la deducción matemática vamos a tener en cuenta dos propiedades de los dispositivos LC. Por un lado, se pueden considerar como elementos de polarización no absorbentes, es decir, la pérdida de luz no depende del voltaje aplicado ni de la polarización de la luz incidente. Esto permite describir este tipo de dispositivos con una matriz unitaria [24, 25]. Cualquier matriz unitaria se puede descomponer como el producto de una rotación y un retardador lineal rotado:

$$M_{Unitaria} = M_{Rot}(\Omega) (M_{Rot}(-\theta) M_R(\Gamma, 0^\circ) M_{Rot}(\theta)) \quad (15)$$

donde $M_{Rot}(\Omega)$ y $M_{Rot}(\theta)$ son matrices de rotación de ángulo Ω y θ respectivamente, $M_R(\Gamma)$ es la matriz asociada al retardador lineal para un retardo Γ , donde el eje rápido está a lo largo del eje X.

$$M_R(\Gamma, 0^\circ) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\Gamma & \sin\Gamma \\ 0 & 0 & -\sin\Gamma & \cos\Gamma \end{pmatrix}; M_{Rot}(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ 0 & -\sin 2\theta & \cos 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (16)$$

Destacar que, a diferencia de las figuras 1-4, en el resto del trabajo estamos utilizando un sistema de referencia de tal forma que los ejes X e Y están a lo largo de las direcciones vertical y horizontal del laboratorio, y el eje Z en la dirección de propagación de la luz. Puesto que estamos tratando con un sistema donde la luz se refleja, nuestro sistema de referencia es tal y como se muestra en la Figura 14:

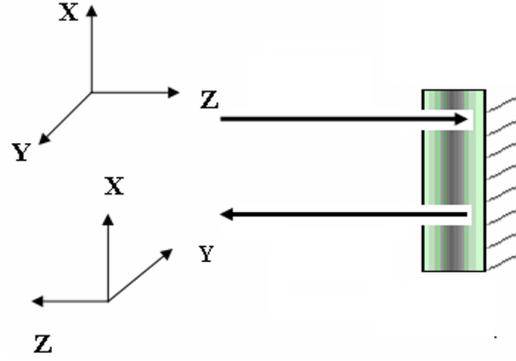


Figura 14: Sistema de referencia.[23]

Por otro lado, este tipo de aparatos se pueden considerar como dispositivos recíprocos [24, 25], lo que nos permite relacionar las matrices asociadas a la luz en el camino de '*ida*' M_f y en el camino de '*vuelta*' M_b de la siguiente forma:

$$M_b = J(M_f)^T J \quad (17)$$

donde J es la matriz de inversión, y tanto M_f y M_b siguen el sistema de referencia indicado en la Figura 14.

$$J = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (18)$$

Como ya hemos dicho, como nuestro dispositivo LC trabaja mediante reflexión y los caminos de '*ida*' y de '*vuelta*' de la luz son iguales, la matriz de reflexión M_{reflex} para un dispositivo LC queda como:

$$M_{reflex} = M_b J M_f \quad (19)$$

Desarrollando esta expresión llegamos a que (más detalles en el Anexo 5.4):

$$M_{reflex} = J M_{Rot}(-\theta) M_R(2\Gamma) M_{Rot}(\theta) \quad (20)$$

que es equivalente a un retardador lineal rotado.

Con todo esto podemos calcular que:

$$M_{reflex}(\Gamma, \theta) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta + \cos 2\Gamma \sin^2 2\theta & (1 - \cos 2\Gamma) \sin 2\theta \cos 2\theta & -\sin 2\Gamma \sin 2\theta \\ 0 & -(1 - \cos 2\Gamma) \sin 2\theta \cos 2\theta & -\sin^2 2\theta - \cos 2\Gamma \cos^2 2\theta & -\sin 2\Gamma \cos 2\theta \\ 0 & -\sin 2\Gamma \sin 2\theta & \sin 2\Gamma \cos 2\theta & -\cos 2\Gamma \end{pmatrix} \quad (21)$$

A continuación, vamos a considerar que sobre nuestro sistema incide luz circularmente polarizada dextrógira, cuyo vector de Stokes asociado es:

$$\vec{S}_{in} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (22)$$

La razón por la que hemos elegido este tipo de polarización para la luz entrante, es porque de esta forma se obtiene la expresión más sencilla posible del vector de Stokes para la polarización de la luz a la salida. Por lo tanto, la polarización a la salida la podemos calcular como $\vec{S}_{out} = M_{reflex} \cdot \vec{S}_{in}$. Para facilitar las cuentas supongamos que $2\Gamma = \Gamma'$.

$$\vec{S}_{out} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ -\sin(\Gamma') \sin(2\theta) \\ -\sin(\Gamma') \cos(2\theta) \\ -\cos(\Gamma') \end{pmatrix} \quad (23)$$

Para tener en cuenta las posibles fluctuaciones del retardo con el tiempo, vamos a suponer que estas variaciones siguen un perfil triangular (ver Figura 15), que además de corresponder a la aproximación más simple (lineal con el tiempo), también se corresponde bastante bien con la realidad, tal y como se demuestra en la literatura sobre el tema [20, 21]:

$$\begin{cases} \Gamma(t) = \Gamma - a + \frac{2a}{T/2}t; 0 \leq t < T/2 \\ \Gamma(t) = \Gamma + 3a - \frac{2a}{T/2}t; T/2 \leq t < T \end{cases} \quad (24)$$

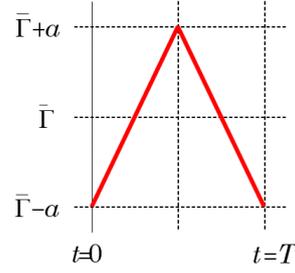


Figura 15: Variación del retardo con el tiempo siguiendo un pulso triangular.[23]

Además, como las fluctuaciones son más rápidas (del orden de 10 ms) que el tiempo de integración habitual de los instrumentos de medida (tales como cámaras o radiómetros), lo que hacemos es el valor medio, es decir, lo que obtenemos a la salida es el valor medio del vector de Stokes, que consiste simplemente en calcular el valor medio del coseno y el seno, llegando a que:

$$\langle \cos \Gamma(t) \rangle = \frac{\sin(a)}{a} \cos \bar{\Gamma} \quad (25)$$

$$\langle \sin \Gamma(t) \rangle = \frac{\sin(a)}{a} \sin \bar{\Gamma} \quad (26)$$

donde $\frac{\sin(a)}{a} = \text{sinc}(a)$, $\bar{\Gamma}$ es el retardo medio y a es la semiamplitud de las fluctuaciones. Por lo tanto, el vector de Stokes de la luz resultante queda como:

$$\langle S_{out} \rangle = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ -\text{sinc}(a) \sin(\bar{\Gamma}) \sin(2\theta) \\ -\text{sinc}(a) \sin(\bar{\Gamma}) \cos(2\theta) \\ -\text{sinc}(a) \cos(\bar{\Gamma}) \end{pmatrix} \quad (27)$$

Si denominamos a las componentes del vector de Stokes resultante como $\langle S_0 \rangle$, $\langle S_1 \rangle$, $\langle S_2 \rangle$ y $\langle S_3 \rangle$, podemos deducir las siguientes expresiones:

$$\text{tg}(\bar{\Gamma}) = \frac{\sqrt{\langle S_1 \rangle^2 + \langle S_2 \rangle^2}}{\langle S_3 \rangle} \quad (28)$$

$$\text{sinc}(a) = \frac{\sqrt{\langle S_1 \rangle^2 + \langle S_2 \rangle^2 + \langle S_3 \rangle^2}}{\langle S_0 \rangle} \quad (29)$$

$$\text{tg}(2\theta) = \frac{\langle S_1 \rangle}{\langle S_2 \rangle} \quad (30)$$

A partir de estas expresiones podemos determinar los tres parámetros del modelo en función del voltaje aplicado:

- A partir de (28), deducimos el retardo medio $\bar{\Gamma}(V)$.
- A partir de (29) deducimos la amplitud de las fluctuaciones $a(V)$, lo que nos da una idea de como calibrar el *flicker*. Esta magnitud también corresponde al grado de polarización (DOP: *Degree of Polarization*) de la luz reflejada en el LCoS.
- A partir de (30) podemos calcular $\theta(V)$, lo que nos indica la orientación del director asociado al cristal líquido.

Antes de explicar el montaje experimental, vamos a ver dos efectos importantes que ocurren en este tipo de dispositivos y que hay que tener en cuenta a la hora de analizar los datos obtenidos:

2.1.1. *Cross-Talk*

En general, cuando enviamos distintos voltajes a los diferentes píxeles, nos gustaría que estos voltajes no interactuaran entre ellos. Por ejemplo, enviamos un voltaje V_1 a un píxel y un voltaje V_2 a un píxel contiguo, y lo ideal sería que estos dos voltajes no interactuasen entre sí. Sin embargo, esto no ocurre, ya que las moléculas de cristal líquido ven una combinación de estos voltajes. Este efecto se conoce como efecto *Cross-Talk* o efecto cruzado entre píxeles vecinos.

2.1.2. *Flicker*

Los voltajes que aplicamos entre las caras del dispositivo PA-LCoS son pulsos rectangulares³ (ver Figura 16).



Figura 16: Pulsos rectangulares.

La señal de voltaje es una señal formada por pulsos binarios. Cada valor de voltaje corresponde a una secuencia determinada de pulsos activados (ON) y desactivados (OFF), de modo que mientras mayor es el voltaje, mayor es el número de pulsos ON. Una secuencia de pulsos dura el tiempo de una imagen (del orden de 20 ms para la señal de vídeo estándar) con lo que los pulsos tienen una duración del orden de milisegundos. Las moléculas

³La principal razón por la que se usa una señal de este tipo es porque la señal está digitalizada.

de cristal líquido reaccionan más lentamente, con lo que básicamente aprecian el valor cuadrático medio de la secuencia de pulsos aplicada. Sin embargo, algo de las variaciones de la secuencia digital sí que influye en las moléculas de cristal líquido, produciendo una pequeña vibración de las mismas, que producen el *flicker* (o parpadeo) en la señal óptica. Estos pulsos se caracterizan por dos cosas. Por un lado, la distancia entre pulsos, y, por otro lado, la amplitud de los pulsos.

En primer lugar, la frecuencia de la señal depende directamente del nivel de gris, es decir, a mayor nivel de gris, menor será la distancia entre los pulsos ya que hay más pulsos activados (ON). El cómo se distribuyen exactamente los pulsos depende del fabricante.

En segundo lugar, la amplitud de estos pulsos es la diferencia entre un voltaje mínimo y un voltaje máximo, y los denominamos como voltaje oscuro V_d y voltaje brillante V_b respectivamente. Hay que destacar que existe un valor mínimo de voltaje para que las moléculas LC comiencen a reorientarse. Para nuestro dispositivo, es 0.5 V aproximadamente.

Entonces, lo que ocurre es que cuando el voltaje es inferior a 0.5 V, las moléculas de cristal líquido están en su posición de reposo (de equilibrio), mientras que cuando el voltaje supera los 0.5 V, comienzan a moverse. Además, estos pulsos los detectan las moléculas LC en un periodo de tiempo muy corto (del orden de los milisegundos), por lo que las moléculas están constantemente rotando y volviendo a su posición de equilibrio. Este efecto es lo que se conoce como *flicker*, y su principal causa es que la señal de voltaje que se envía al PA-LCoS no es constante.

Cuanto mayor sea $\Delta V = V_b - V_d$, mayor será el rango del retardo con el que podemos trabajar, pero también aumenta el *flicker*. Y cuanto menor sea la distancia entre pulsos, se reducirá el *flicker*.

Por lo tanto, es importante alcanzar un equilibrio entre la distancia y amplitud de los pulsos y los valores de V_b y V_d , para así obtener el mayor rango dinámico de retardo con el menor *flicker* posible. Para este experimento, nuestra V_d es de 0.56 V y la V_b es de 2.34 V. Otra cosa a tener en cuenta, es que el cristal líquido es un medio parcialmente viscoso, por lo que las moléculas no responden inmediatamente al voltaje que le llegan. Su tiempo de respuesta está alrededor de los 5 ms.

2.2. Montaje Experimental:

En este apartado vamos a nombrar los instrumentos utilizados para el trabajo y cómo se ha realizado el montaje experimental:

1. Modelo CPS532 laser diode, marca Thorlabs. Este dispositivo es un láser de estado sólido bombeado por diodos (DPSSL, *diode pumped solid state laser*) que genera un haz de longitud de onda de 532 nm.
2. Modelo PLUTO-2.1 LCoS Spatial Light Modulator (Phase Only), marca HOLO-EYE. Este dispositivo LC reflexivo se basa en cristal líquido nemático con una resolución de 1920 x 1080 píxeles y una diagonal de 0.7". Además, este dispositivo posee un *pixel pitch* (distancia entre los centros de dos píxeles) de 8.0 μm y nos permite utilizar 256 niveles de gris.
3. Modelo DMK33UX249, marca Imaging Source. Este dispositivo es una cámara monocromática industrial con una resolución de 1920 x 1200 píxeles, de tamaño 5.86x5.86 μm , y una tasa de *frames* de 48 fps. Además, proporciona una señal digital de salida de 8 bits ó de 12 bits.
4. Tres polarizadores lineales.
5. Dos espejos.
6. Atenuador variable para atenuar la intensidad del haz de láser, y así evitar la saturación de la cámara.
7. Filtro espacial.
8. Lente de focal de 10 cm. Colima el haz del láser.
9. Dos láminas retardadoras $\lambda/4$.
10. Lente de focal de 15 (cm).
11. Diafragma.

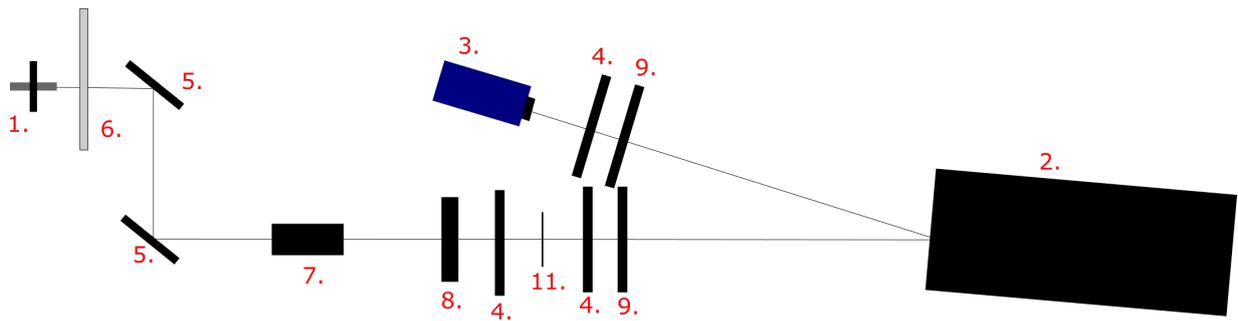


Figura 17: Esquema del montaje experimental.

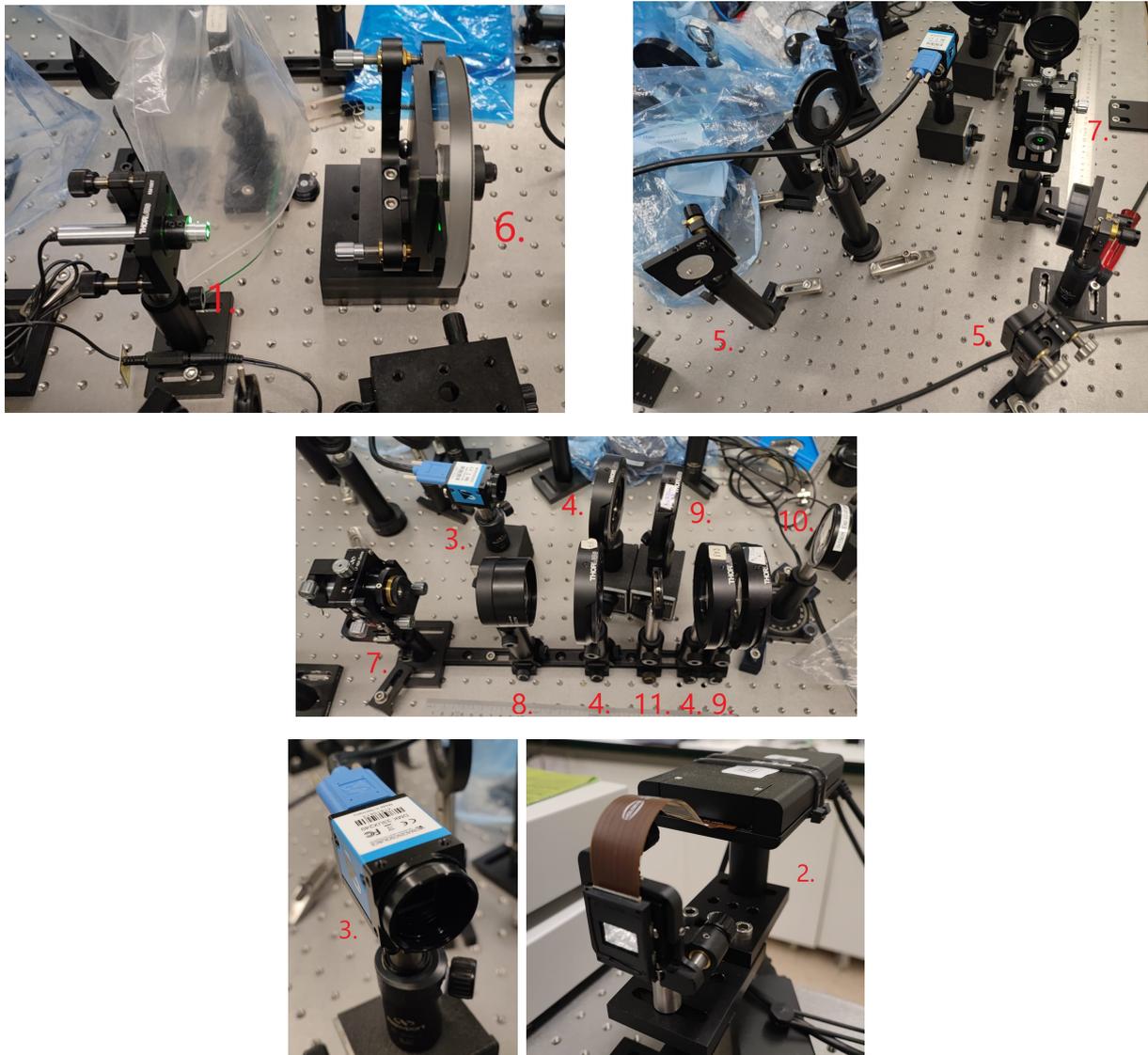


Figura 18: Montaje Experimental.

En cuanto al montaje experimental, en primer lugar, dirigimos el haz del láser hacia el dispositivo LCoS haciéndolo reflejar en dos espejos. A lo largo de este recorrido, el haz pasa a través de un atenuador variable, ajustado de tal forma que no sea capaz de saturar la cámara. Para ajustarlo, lo único que tenemos que hacer es que el haz incida sobre la cámara con su máxima intensidad, y asegurarnos que de esa manera no satura la cámara 3., porque si es así, cuando coloquemos los dispositivos polarizadores 4., el haz en ningún momento va a tener mayor intensidad, lo único que puede suceder es que disminuya, por lo que la cámara no puede estar saturada de ninguna manera.

En segundo lugar, el haz pasa por un filtro espacial 7., con el objetivo de aumentar el tamaño del haz del láser. A continuación, colimamos el haz con una lente de 10 cm de focal. Es importante ajustar la distancia entre la lente y el filtro espacial para obtener un haz colimado.

En tercer lugar, el haz colimado pasa por un polarizador lineal adicional con el único objetivo de atenuar aún más el haz, porque solamente con el atenuador variable no es suficiente para evitar la saturación de la cámara. Durante el experimento, se dedujo que el eje de transmisión del polarizador debía estar a unos 26° respecto de la vertical aproximadamente, para así evitar por completo la saturación. Además, también ponemos un diafragma para controlar el tamaño del haz que llega al LCoS.

En cuarto lugar, tenemos un polarizador lineal a 0° (eje de transmisión a 0° respecto el eje vertical del laboratorio), seguido de una lámina retardadora $\lambda/4$ con su eje rápido a 45° respecto la vertical. Con esta combinación obtenemos luz circularmente polarizada dextrógira. Entonces, el haz ya incide en el dispositivo LCoS.

Por último, la micropantalla LCoS se encuentra en un soporte giratorio, y recordando que es un dispositivo de reflexión, la giramos 5° , de tal forma que el haz reflejado vaya dirigido a la cámara. En este último tramo del recorrido, el haz pasa por una lente de 15 cm de focal, por una lámina retardadora $\lambda/4$ y por un polarizador lineal a 0° . Por un lado, la lente la colocamos a una distancia del LCoS de dos veces la focal y, a su vez, la cámara la colocamos a una distancia de dos veces la focal respecto la propia lente, porque así somos capaces de proyectar en la cámara el plano del LCoS, que es el plano del frente de onda que queremos caracterizar. En caso contrario, estaríamos en otros planos desenfocados, y se mezclaría la información de los diversos píxeles del LCoS entre sí a medida que se propagase el frente de onda. Por otro lado, el ángulo del eje de transmisión del polarizador está fijo, y cambiamos el ángulo del eje rápido respecto la vertical del laboratorio de la lámina retardadora, específicamente, elegimos cuatro orientaciones que nos permitan calcular los cuatro parámetros de Stokes, que en nuestro caso son: -90° , -45° , 30° y 60° .

Por lo tanto, una vez que está claro el montaje experimental, ya podemos tomar las medidas. Para ello, hemos diseñado un programa de *LabView* (detalles del programa en el Anexo 5.2) que toma una foto de lo que le llega al sensor de la cámara, para cada uno de los 256 niveles de gris uniformes que enviamos a la pantalla LCoS, por lo que obtenemos 256 imágenes para un determinado ángulo de la lámina retardadora. Si repetimos este proceso para el resto de ángulos, al final acabamos con 256 imágenes correspondientes a cada nivel de gris para cuatro ángulos diferentes de la lámina retardadora. Tras obtener todas estas imágenes, con un programa hecho con *MatLab* (detalles del programa en el Anexo 5.1), realizamos su análisis, siendo capaces de obtener la intensidad, los parámetros de Stokes, el retardo lineal, la orientación del director y el *flicker* para los distintos niveles de gris.

3. Resultados

Antes de comenzar a realizar las medidas mediante el método que hemos explicado, nos interesa tener una referencia para comparar nuestros resultados. Para ello, hemos realizado las medidas que hemos explicado en la metodología, pero utilizando un radiómetro en lugar de una cámara. A diferencia del método con la cámara, con el radiómetro estudiamos un punto en lugar de toda la pantalla del LCoS.

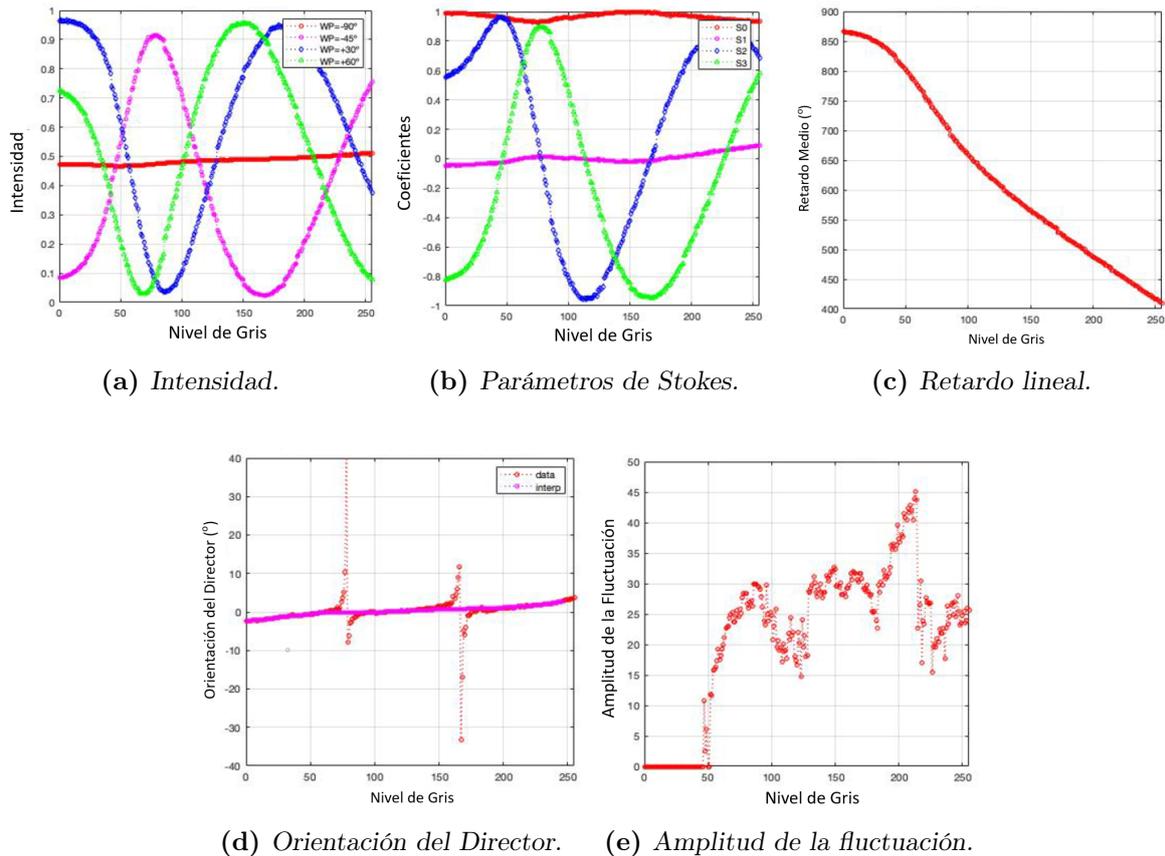


Figura 19: Medidas experimentales para un punto utilizando un radiómetro.

En esta Figura 19, podemos observar como varían los distintos parámetros del LCoS con el nivel de gris. Con este resultado solamente queremos presentar los resultados de referencia con los que vamos a comparar nuestras medidas con la cámara, por lo que a lo largo de este apartado comentaremos en detalle cada uno de los parámetros que vemos en esta figura. Aunque sí que es importante destacar que el rango dinámico del retardo lineal es de 456° .

Volviendo a las medidas con la cámara. En primer lugar, las imágenes con los que vamos a trabajar tienen una resolución de 1920×1200 píxeles, formato *tiff* y una profundidad de

8 bits, es decir, nuestro rango de intensidades expresado mediante niveles de gris va de 0 a 255. En cuanto a los parámetros iniciales de la cámara, los valores de ganancia y nitidez están ajustados a 0, el gamma vale 1, y el tiempo de exposición que utilizamos es de 10 ms. Esto es debido a que para este tiempo de integración tenemos un buen promedio de la señal que proporciona el cristal líquido a pesar del *flicker*.

Antes de empezar la toma de medidas, vamos a comprobar para estos parámetros de configuración, que la cámara trabaja linealmente con la intensidad que recibe. Para ello, lo único que tenemos que hacer es comparar las medidas de intensidad tomadas por la cámara con las tomadas por un radiómetro.

Para tomar las medidas partimos del montaje experimental que ya hemos explicado. Lo que tenemos que hacer en este caso, es sustituir la lamina retardadora tras la cámara por otro polarizador, de forma que los dos polarizadores que están detrás de la cámara tengan sus ejes principales cruzados. Además, apagamos el LCoS ya que simplemente queremos que refleje la luz, y, por último, colocamos una lámina semirreflejante entre el polarizador y la cámara para dividir el haz en dos partes: una que incida en la cámara y otra que incida en el radiómetro. Con todo esto, tomaremos algunas medidas de intensidad variando la orientación de uno de los polarizadores.

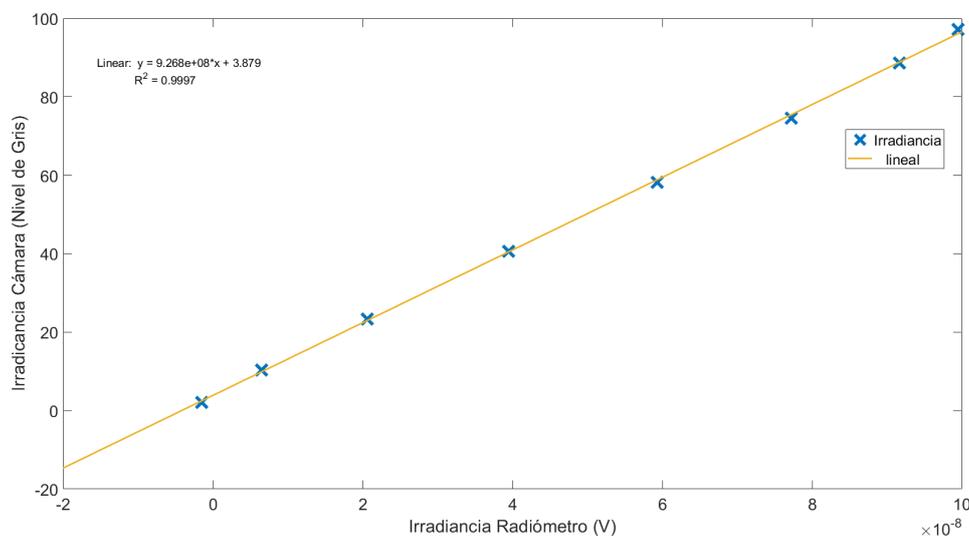


Figura 20: Intensidad medida por la cámara frente a la medida por un radiómetro. Tal y como se puede observar, hemos ajustado los puntos experimentales con una recta con un R^2 de 0.997.

Tal y como podemos observar en la Figura 20, obtenemos una línea recta, por lo que podemos asegurar que la relación entre la intensidad que le llega a la cámara y lo que mide su sensor tiene una relación lineal. Esto es importante saberlo, porque nosotros

vamos a trabajar con los niveles digitales de las imágenes tomadas por la cámara. Además, también es importante poder diferenciar sobre qué zonas del LCoS estamos midiendo, y verificar que las imágenes tomadas para las 4 orientaciones del retardador de salida no se encuentran desplazadas entre sí. Para ello, vamos a utilizar una imagen con un patrón (ver Figura 21) para poder identificar los píxeles del LCoS sobre la cámara. Lo que



Figura 21: Imagen patrón que nos permite comprobar el alineado de los píxeles.

hacemos es capturar esta imagen para las cuatro orientaciones de la lámina retardadora, que mostramos en la Figura 22 y comprobamos si la imagen patrón ocupa los mismos píxeles de la cámara u ocupa otros para las distintas orientaciones. Si nos fijamos en el píxel central, por ejemplo, obtenemos un error inferior a ± 2 píxeles tanto en fila como columna. Estamos hablando de filas y columnas, porque como ya hemos dicho, trabajamos con imágenes pixeladas, por lo que las podemos ver como una matriz de 1200 filas por 1920 columnas, donde cada elemento corresponde a un píxel. Este error de la posición de los píxeles es muy pequeño, y se puede deber al efecto de la difracción y el desenfoque que sufre la luz tras pasar a través de tantos elementos ópticos.

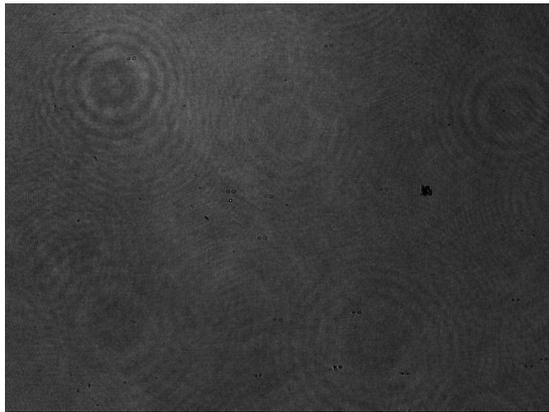
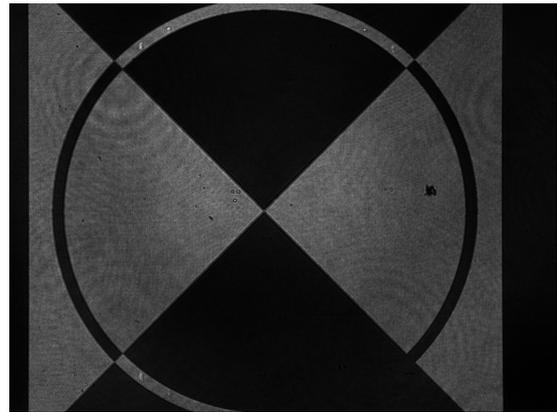
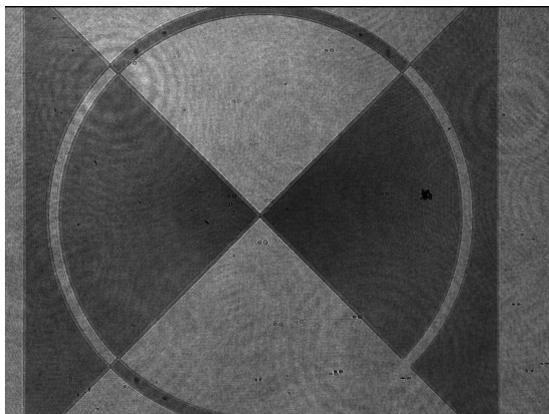
(a) Lámina retardadora a -90° .(b) Lámina retardadora a -45° .(c) Lámina retardadora a 30° .(d) Lámina retardadora a 60° .

Figura 22: Imagen para estudiar la alineación de los píxeles para las cuatro orientaciones de la lámina retardadora.

En la Figura 22a no podemos distinguir el patrón ya que para esa orientación la intensidad se mantiene casi constante con el nivel de gris como veremos a continuación, con lo que apenas tenemos contraste.

Una vez que ya hemos hecho todas estas comprobaciones previas, vamos a comenzar con las medidas. Con este método, somos capaces de obtener los valores de intensidad, parámetros de Stokes, orientación del director y *flicker* para cualquier píxel de la cámara en función de los niveles de gris. Por lo tanto, vamos a centrarnos en tres píxeles, que en la matriz de las imágenes digitalizadas corresponderían a las siguientes posiciones (coordenadas (x,y)) (ver Figura 23):

- Píxel 1: (564, 498)

- Píxel 2: (967, 837)
- Píxel 3: (1335, 576)

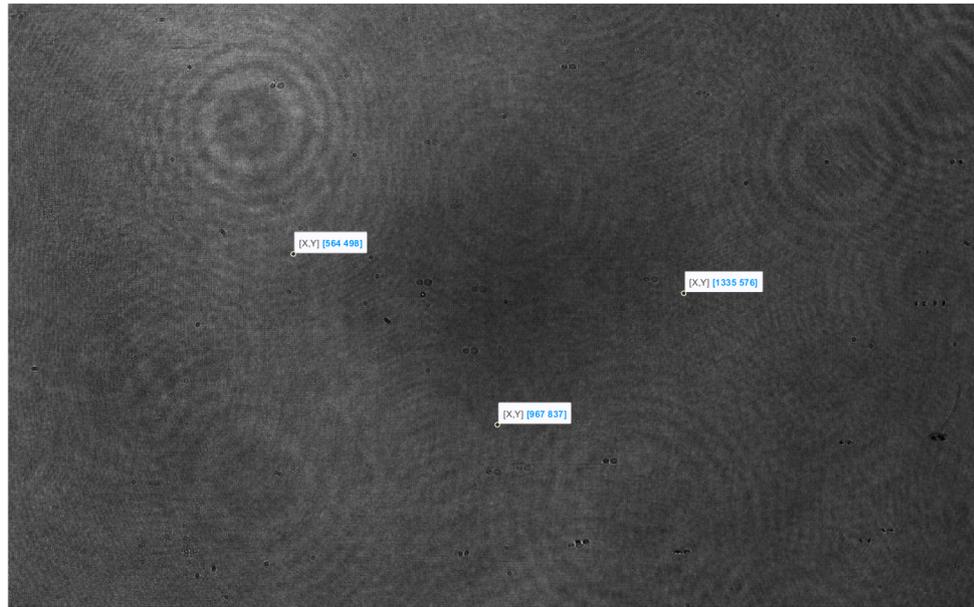


Figura 23: Imagen tomada por la cámara para un nivel de gris de 55, donde hemos marcado los tres píxeles que vamos a estudiar durante el TFG.

Básicamente, lo que estamos haciendo es mandar luz circularmente polarizada dextrógira al LCoS. Cuando enviamos voltajes, éste actúa como un retardador lineal variable, es decir, dependiendo de la orientación de las moléculas LC, la pantalla LCoS introduce diferentes desfases entre la componente ordinaria y extraordinaria (líneas neutras del LCoS) de la luz incidente, por lo que tras reflejarse, obviamente la luz presentará un cambio de polarización. A continuación, la luz pasa por una lámina retardadora y un polarizador lineal que nos permiten hacer distintas proyecciones de la luz, es decir, mediante las cuatro orientaciones de la lámina retardadora estamos haciendo cuatro proyecciones del haz para obtener cuatro valores de intensidad para cada nivel de gris, que luego transformaremos algebraicamente para obtener el estado de polarización que produjo estas proyecciones. A modo de ejemplo, en la Figura 24, el sistema analizador $WP=-45^\circ$ (WP es la lámina retardadora con la que elegimos que orientación queremos estudiar) está ajustado para luz circularmente polarizada, por lo que cuando la intensidad tiene valores cercanos a 1, la luz que estamos obteniendo del LCoS es circular dextrógira. Sin embargo, tal y como

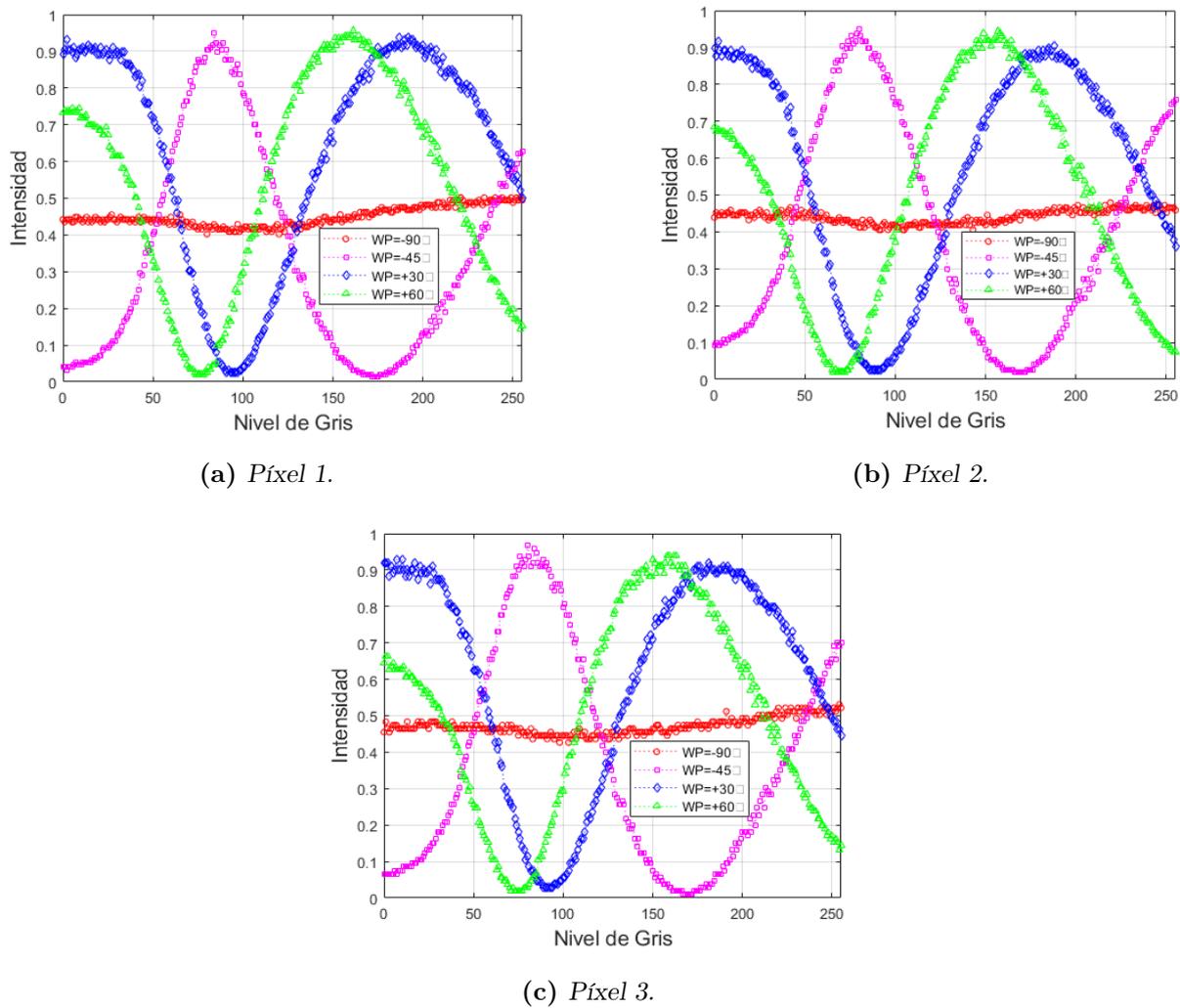


Figura 24: Intensidad en función de los niveles de gris para tres píxeles. Las medidas están normalizadas.

podemos observar nunca alcanza 1, y esto se debe a que la luz no presenta un estado de polarización estático, sino que fluctúa debido al *flicker*, haciendo que el promedio de la luz no sea un "círculo perfecto", al ser parcialmente despolarizada. Además, cuando la intensidad tiene valores muy cercanos al 0, también corresponde a luz circular, pero con el sentido de giro opuesto, es decir, supongamos que cuando la intensidad es máxima con un valor cercano a 1 estamos hablando de luz dextrógira, entonces cuando tiene un mínimo cercano a 0, entonces tenemos luz circular levógira.

Tal y como podemos observar en la Figura 24, las medidas para los tres píxeles son parecidas, pero no iguales. Esto se debe principalmente a dos causas: la iluminación de la

pantalla no es exactamente uniforme, es decir, no llega la misma cantidad de luz en dos zonas distintas de la pantalla (esto no es importante en el caso de los parámetros de Stokes), y otra causa son los efectos de *flicker* y el ruido de los dispositivos de medida (más detalles en el Anexo 5.3).

A continuación, vamos a ver los distintos estados de polarización que obtenemos en función de los niveles de gris con la Figura 25.

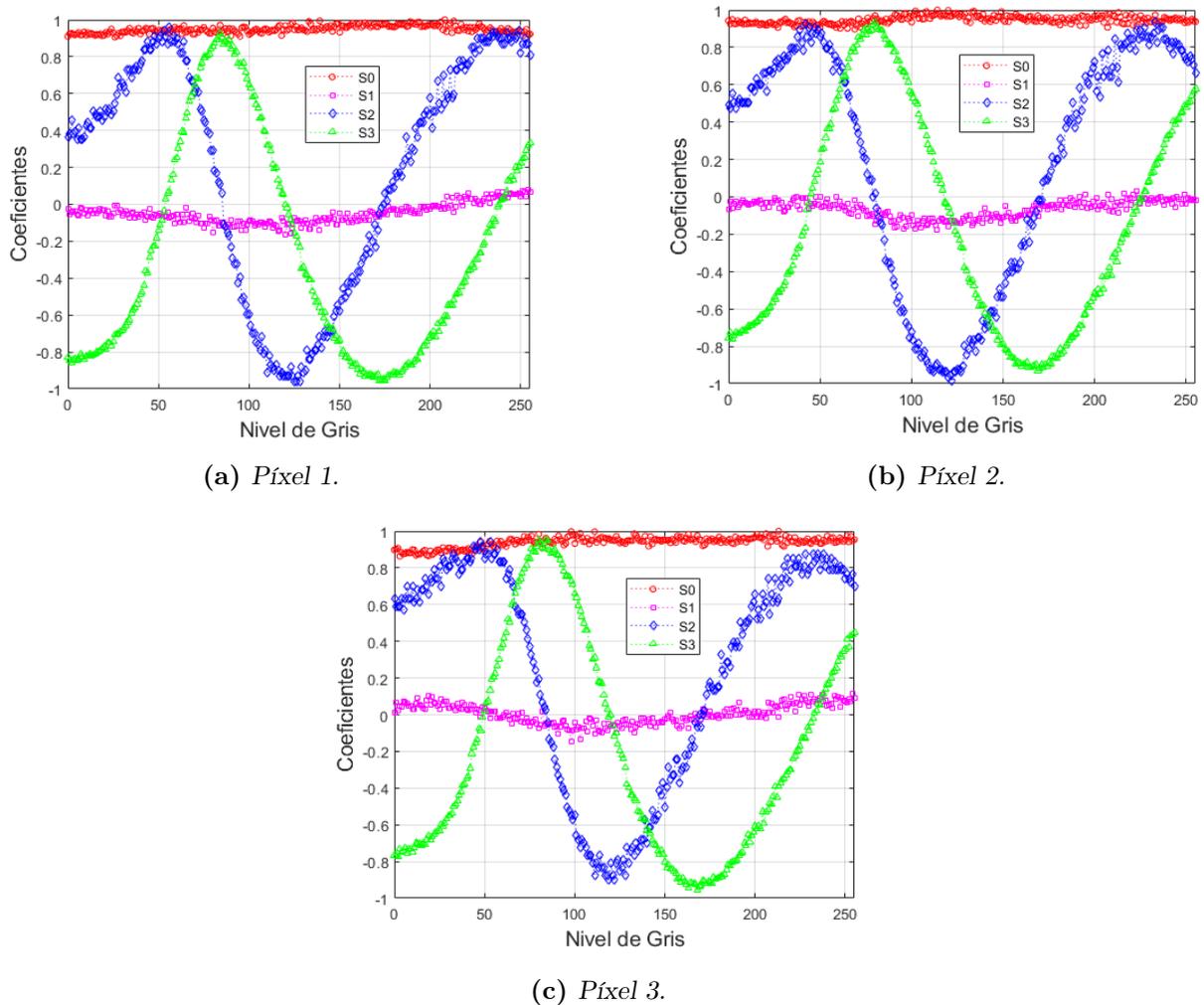


Figura 25: *Parámetros de Stokes en función de los niveles de gris. Las medidas están normalizadas globalmente.*

En estas gráficas simplemente estamos representando los parámetros de Stokes para distintos niveles de gris, lo que nos permite saber qué tipo de luz polarizada obtenemos debido al voltaje que le aplicamos al LCoS. Recordando el significado de cada parámetro de Stokes, sabemos que S_0 representa la energía total, por lo que si estamos utilizando

valores normalizados, siempre debe valer 1, que es lo ocurre de forma aproximada en las tres gráficas de la Figura 25. También es interesante ver cómo se comporta el S_1 , que nos indica la tendencia de la luz a parecerse a un estado de polarización lineal horizontal o vertical. En este caso, oscila alrededor del 0. Esto significa que las líneas neutras del retardador variable al que equivale el LCoS coinciden con los ejes X e Y del sistema de referencia que estamos utilizando (ejes vertical y horizontal del laboratorio). Esto se puede entender de la siguiente manera: La luz incidente, circular dextrógira, tiene igual magnitud a lo largo de los ejes X e Y. Si las líneas del retardador variable coinciden con estos ejes, la magnitud del campo eléctrico tras la pantalla LCoS sigue teniendo igual magnitud en X e Y, por lo que S_1 debe ser 0. Además, como siempre, en estas medidas hay presente algo de ruido experimental⁴ y de *flicker* del propio LCoS.

También es interesante utilizar una normalización local, que en principio no se ve afectada por el ruido de otros niveles de gris, ya que las medidas las normalizamos de forma independiente para cada nivel de gris (máximo local).

En esta gráfica de la Figura 26, podemos ver que lo único que ha cambiado es el parámetro S_0 , que ahora es constante y vale 1, tal y como era de esperarse, ya que representan la energía total del sistema. Esta normalización es en principio más robusta al no verse afectada por el ruido que puede haber en otros niveles de gris. Sin embargo, resulta interesante monotonizar S_0 con la normalización global (ver Figura 25) para detectar si hay efectos no esperados que hiciesen que S_0 se alejase de 1 en algunos niveles de gris. En nuestro caso, S_0 es cercano a 1 en todos los niveles de gris en la Figura 25, lo cual nos da seguridad que la toma de medidas y el modelo teórico son consistentes. De este modo, podemos usar tanto los parámetros de Stokes de la Figura 25 ó 26 para obtener los parámetros que caracterizan a la pantalla LCoS frente al voltaje aplicado, ya que son prácticamente iguales.

Una vez sabemos los parámetros de Stokes, ya podemos estudiar los tres parámetros (retardo lineal, orientación del director y *flicker*) de interés que hemos comentado al principio. En primer lugar, tenemos el retardo en función del nivel de gris en la Figura 27. Destacar que los puntos que vemos que están fuera de la curva (*outliers* en inglés), es debido al ruido de las medidas. Tal y como podemos observar en la Figura 27, a mayor nivel de gris, menor es el retardo, concretamente, el retardo varía entre un máximo alrededor de 860° aproximadamente y un mínimo sobre 415° , por lo que el rango dinámico del voltaje es de unos 445° , que es mayor que 360° . Éste es el mínimo retardo que exigimos para que nuestro dispositivo presente buenas propiedades, que le permitan modificar el

⁴Ruido coherente de la luz láser, ruido optoelectrónico del sensor de la cámara, etc.

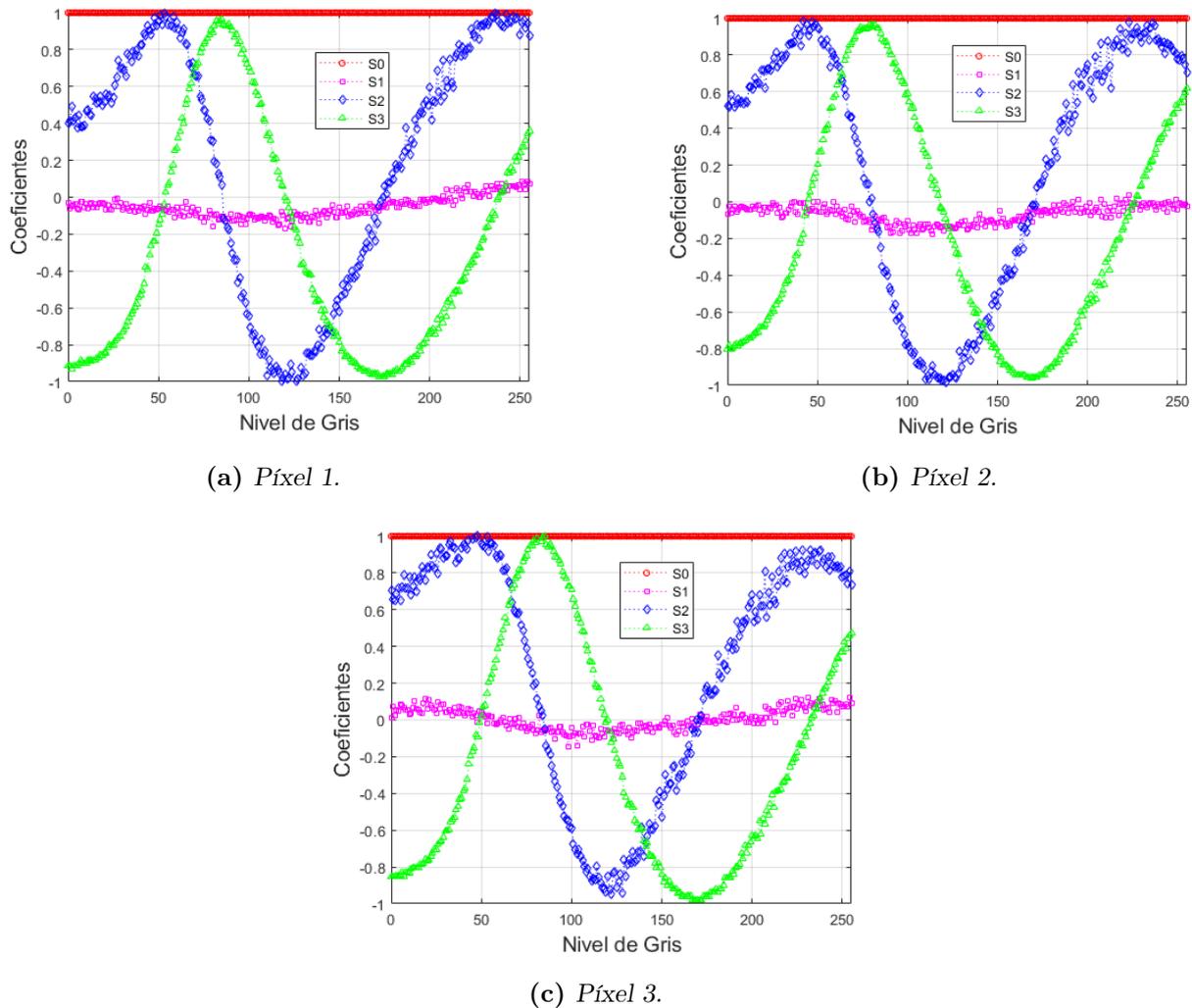


Figura 26: *Parámetros de Stokes en función de los niveles de gris. Las medidas están normalizadas localmente.*

frente de onda.

El retardo lo obtenemos a partir de la arcotangente, tal y como podemos deducir a partir de la expresión (30), que está limitada al rango entre -180° y 180° . Para realizar las gráficas que presentamos en la Figura 27 desenrollamos la fase, que consiste en buscar saltos cercanos a 180° entre niveles de gris consecutivos, y luego sumamos o restamos 180° para que la curva sea continua. Para que los resultados sean consistentes con los obtenidos gracias al análisis de un punto de la zona central del LCoS con un radiómetro, le sumamos a nuestra curva continua un múltiplo de 180° para desplazar la curva y que las valores máximos y mínimos coincidan aproximadamente con los de referencia de la

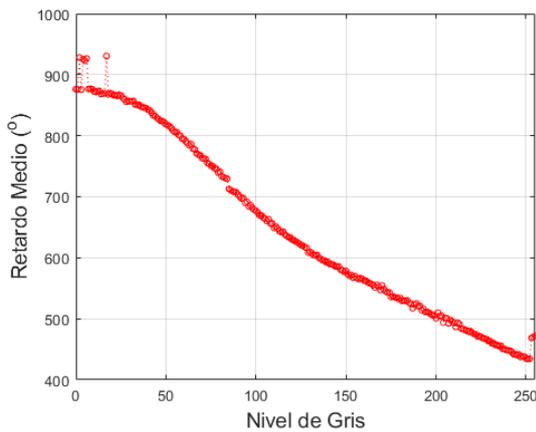
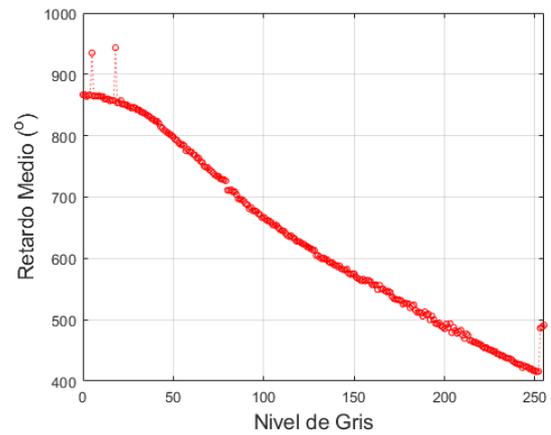
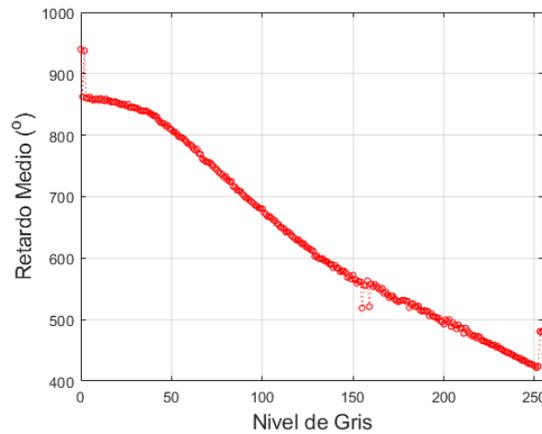
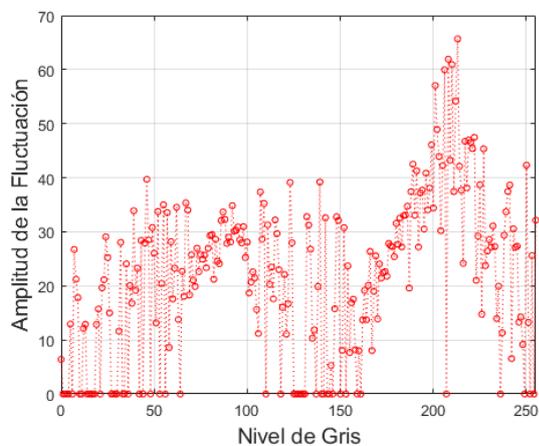
(a) *Píxel 1.*(b) *Píxel 2.*(c) *Píxel 3.***Figura 27:** *Retardo lineal en función del nivel de gris.*

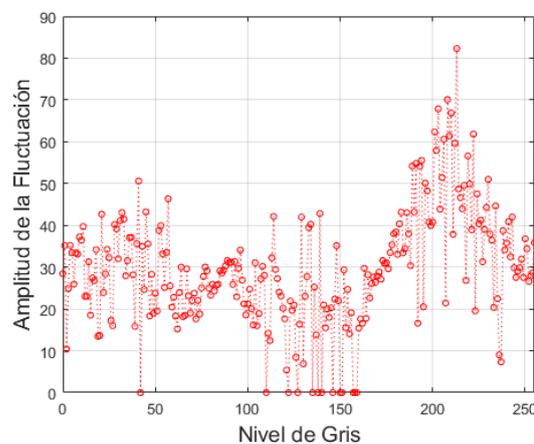
Figura 19. El valor que le debemos sumar exactamente depende del píxel que estamos estudiando, pero en general es suficiente con sumar 720° . Independientemente de lo que le sumemos a nuestra curva, lo que realmente es importante, físicamente hablando, es que el rango dinámico del retardo supere los 360° y esté alrededor de los 450° . Destacar que el rango dinámico del retardo debe ser de al menos 360° , porque de esa forma nuestro dispositivo LCoS es capaz de simular cualquier frente de onda cuyos rangos dinámicos sean múltiplos de 2π . Estos rangos corresponden a dispositivos de refracción como lentes y prismas. Como en este TFG estamos calibrando para un rango de unos 450° , está claro que para un rango de 2π también se puede calibrar perfectamente. De esta forma, en la práctica, solo utilizaríamos el rango de 360° , es decir, no emplearíamos todos los niveles

de gris.

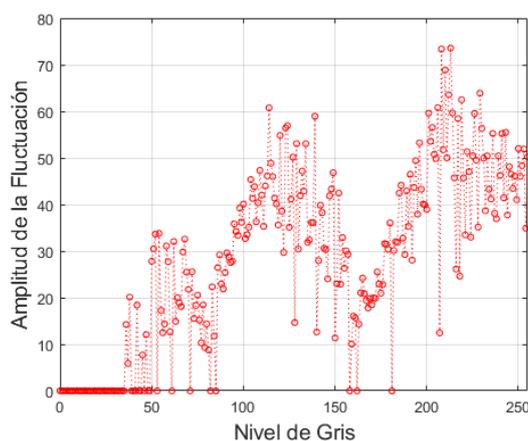
En segundo lugar, también podemos obtener el *flicker* (ver Figura 28). Para interpretar



(a) *Píxel 1.*



(b) *Píxel 2.*



(c) *Píxel 3.*

Figura 28: *Flicker* (en grados) en función del nivel de gris.

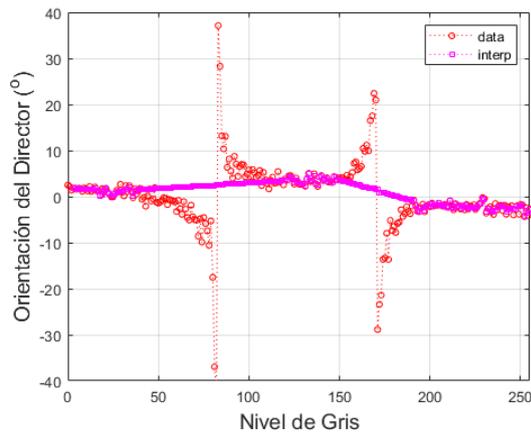
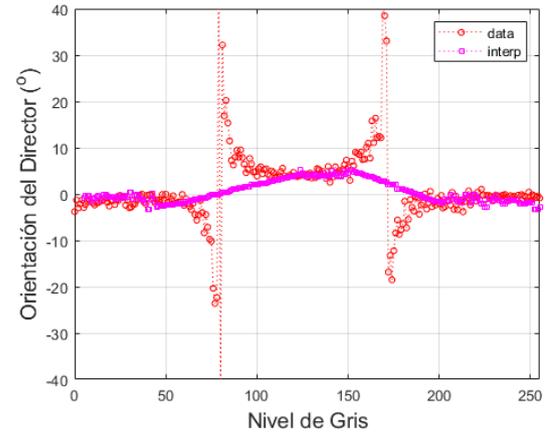
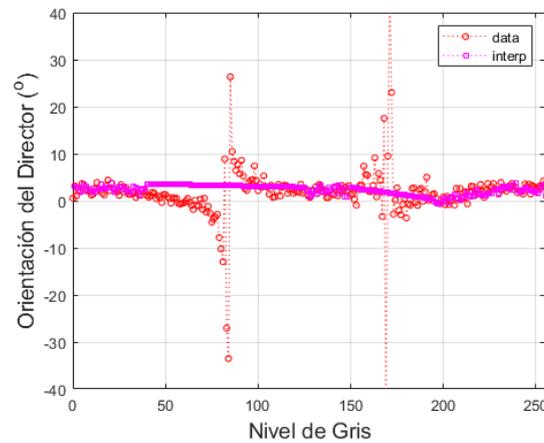
correctamente esta gráfica, tenemos que recurrir a las gráficas de la Figura 27. Lo que tenemos que tener claro es que el retardo está relacionado con la posición de las moléculas LC, en específico, cuánto se han inclinado a lo largo del eje perpendicular a las caras del LCoS, lo que se conoce como ángulo de inclinación. Como ya hemos explicado en el apartado del *flicker*, las moléculas se están moviendo continuamente a lo largo del eje de inclinación, en ningún momento están completamente estáticas, y a este movimiento lo llamamos *flicker*. Y esto es lo que nos está intentando mostrar la figura 28. Por lo tanto, lo que hacemos es fijarnos en un nivel de gris específico de la gráfica del retardo, y luego

nos fijamos en ese mismo nivel de gris en la figura del *flicker*, entonces el valor de la fluctuación asociado a ese nivel de gris, indica lo que puede variar el valor del retardo para ese voltaje. Por ejemplo, en el píxel 2, nos vamos a fijar en el nivel de gris 114. Si miramos ahora la Figura 28b, vemos que ese nivel de gris tiene asociado un valor de fluctuación de 42° , lo que significa que para un nivel de gris 114, tenemos un retardo medio de unos 635° con una fluctuación de $\pm 42^\circ$ en torno a dicho valor medio. Podemos ver que las gráficas de la Figura 28 son bastante más ruidosas que la correspondiente a la medida del radiómetro (ver Figura 19e). Esto se debe a que estas medidas son muy sensibles a cualquier ligero desalineamiento en la toma de medidas. En el caso de las medidas con la cámara, los efectos de difracción y el ruido coherente debido al uso de luz láser, van a afectar a la toma de medidas e incrementar el ruido en la caracterización del *flicker*. Aun así, se puede ver que los valores y las tendencias en las medidas en la Figura 28 son consistentes con los de la Figura 19e.

Por último, vamos a estudiar la orientación del director asociado a estos tres píxeles que hemos estado analizando. Para ello conviene indicar que, en general, las pantallas LCoS de alineación paralela disponibles comercialmente, acostumbran a tener el director alineado en la dirección de las filas de la estructura pixelada. Nosotros, de cara a la toma de medidas, hemos colocado el LCoS de modo que las filas de píxeles coincidan con la horizontal del laboratorio. De este modo, la orientación θ del director debería ser de 0° respecto de la horizontal, y constante para todos los niveles de gris.

En primer lugar, lo que más llama la atención de las gráficas de la Figura 29, es la gran variación que sufren los puntos de color rojo (en la leyenda se denominan *data*), y que no reflejan la realidad. Recordar que estos puntos rojos corresponden a valores de θ , que no es más que la inclinación de las moléculas LC respecto el eje horizontal. Estas gráficas están hechas de tal forma que, en un caso ideal, no deberíamos ser capaces de determinar si las moléculas han rotado, es decir, si no aplicamos voltaje, el eje extraordinario de las moléculas es paralelo a las caras del LCoS, entonces podemos imaginarnos una serie de planos que conectan las dos caras del dispositivo y que contienen los ejes extraordinarios de las moléculas. Cuando aplicamos un voltaje entre las dos caras, las moléculas comienzan a rotar, y este movimiento lo hacen siempre dentro de este plano. Por lo tanto, lo que estamos midiendo es la proyección del eje extraordinario de las moléculas respecto su plano de rotación. Como ya hemos dicho, según lo que hemos explicado en el apartado de teoría y el párrafo anterior, cabría esperar que esta gráfica fuera una línea constante⁵, ya que la rotación de las moléculas, en principio, se realiza dentro de este plano. Pero esto no ocurre en la realidad, sino que la molécula, al rotar se sale del plano y lo que medimos

⁵Esta línea recta tendría que valer 0° según como hemos definido nuestro sistema de referencia.

(a) *Píxel 1.*(b) *Píxel 2.*(c) *Píxel 3.***Figura 29:** Orientación del director (en grados) en función del nivel de gris.

es el ángulo θ que se salen las moléculas respecto del plano horizontal.

Por lo tanto, aunque es cierto que las moléculas se salen del plano horizontal al rotar, es un movimiento muy pequeño, por lo que las gráficas, donde tenemos grandes variaciones de θ , no representan la realidad.

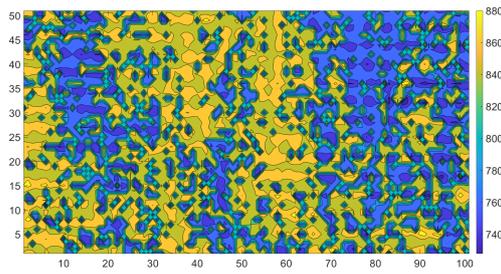
Los valores de θ los obtenemos de despejar directamente de la ecuación (30). Si nos fijamos en los valores de $\langle S_1 \rangle$ y $\langle S_2 \rangle$ en la expresión (27), podemos ver como se anulan si $\bar{\Gamma}$ vale $k \cdot 180^\circ$ (siendo k un número entero), lo que implica que el cociente de la expresión (30) es una indeterminación. Esto corresponde a las largas variaciones que ya hemos comentado. Una forma de solucionar este problema es considerar que los puntos calibrados son los que cumplen que $\bar{\Gamma} = 90^\circ + k \cdot 180$ y los que se encuentran en un rango de 60° alrededor de

estos. Entonces, aplicando una interpolación cúbica obtenemos las curvas de color rosa. Tal y como habíamos dicho, estas curvas no son constantes y no valen 0° , sino que oscilan alrededor de este valor. Las causas de estos movimientos son muy complejas ya que hay muchos fenómenos implicados, como por ejemplo, tensiones entre moléculas vecinas, propiedades internas del cristal líquido, etc. También hay que tener en cuenta que cuando se hacen experimentos de este estilo, hay luz que se difracta entre los píxeles del LCoS, y esto genera distorsiones en el campo eléctrico que uno mide, es decir, que a pesar de que enviamos un campo eléctrico en un determinado estado, se puede distorsionar, quitando estabilidad a las medidas.

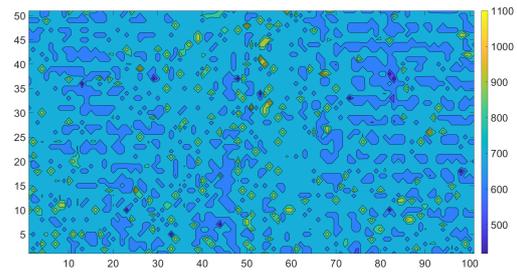
Si comparamos todas las medidas que hemos realizado para los tres píxeles de la cámara con las medidas para un solo punto realizadas mediante un radiómetro (ver Figura 19), podemos ver como son bastante similares. Las mayores diferencias las encontramos en las gráficas de la orientación del director y la amplitud de las fluctuaciones. Esto se debe a que estas dos magnitudes son muy sensibles a las incertidumbres asociadas al método experimental de medida, ya que están relacionadas con pequeños movimientos que realizan las moléculas LC de forma muy rápida. Sin embargo, lo importante es que la curva de interpolación de la orientación del director sea cercana a 0° y que la amplitud de la fluctuación no presente valores máximos muy altos.

Por ahora solo hemos analizado píxeles por separado, pero lo que nos interesa saber realmente, es si el comportamiento que han presentado estos píxeles también lo presentan el resto de píxeles de la cámara. En un caso ideal, todos los píxeles se deberían comportar igual para un determinado nivel de gris. Por lo tanto, para ver qué ocurre exactamente, lo que vamos a representar es un mapa de contorno del retardo lineal, por ejemplo. Puesto que tenemos una gran cantidad de píxeles en el sensor de la cámara (2.304.000 píxeles), para aliviar la carga computacional del ordenador, vamos a utilizar una pequeña zona de 50×100 píxeles del sensor, que corresponde a la zona central del LCoS, obteniendo la Figura 30.

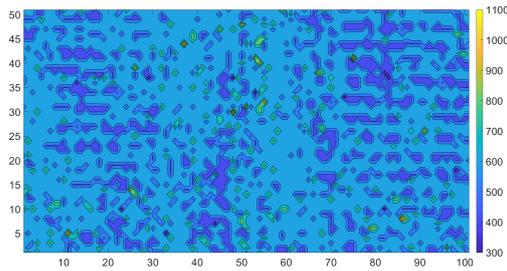
Tal y como podemos observar, existen grandes variaciones del retardo asociado a los distintos píxeles dentro de cada nivel de gris, cuando lo que uno esperaría es que fueran valores muy próximos. Esto se debe principalmente al ruido que se introduce en la toma de las medidas experimentales y el *flicker*, por un lado, y también es debido a las operaciones matemáticas que realizamos para representar el retardo. Tal y como ya habíamos comentado en las gráficas del retardo de la Figura 27, dependiendo del píxel que estudiemos, le debemos sumar un múltiplo distinto de 180° para que el rango del retardo sea consistente con nuestras medidas de referencia del radiómetro. Es por ello, que cuando realizamos la superficie de contorno, es muy complicado saber cuál es el múltiplo de 180°



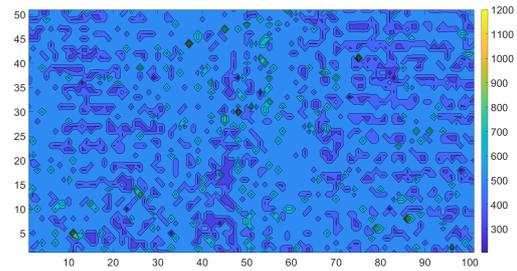
(a) Nivel de Gris 1.



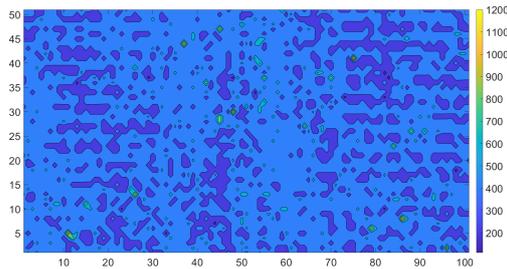
(b) Nivel de Gris 50.



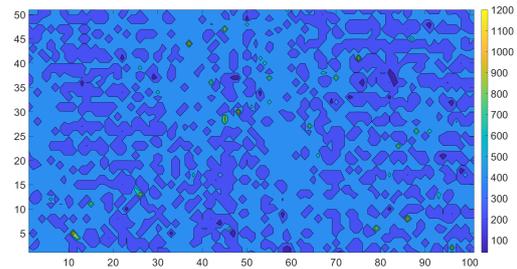
(c) Nivel de Gris 100.



(d) Nivel de Gris 150.



(e) Nivel de Gris 200.



(f) Nivel de Gris 250.

Figura 30: Retardo lineal para 50x100 píxeles para distintos niveles de gris en una zona central del LCoS.

que debemos sumar, por lo que lo hemos dejado fijo a 720° . Esto puede provocar grandes variaciones del retardo para un nivel de gris en concreto.

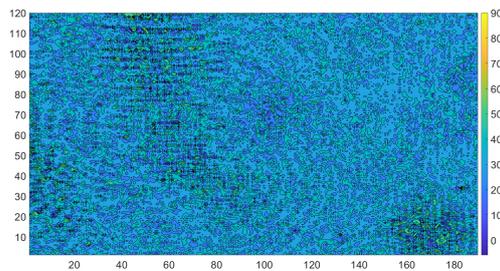
Una posible solución, es utilizar el retardo enrollado para hacer los mapas de contorno. De esta forma, nuestros valores en ningún momento superarán los 180° , y las variaciones que observaremos ya no se deberan a cuestiones matemáticas.

Por otro lado, para intentar disminuir el efecto del ruido, lo que podemos hacer es trabajar con superpíxeles ⁶. En este caso, los superpíxeles representan agrupaciones de 10x10

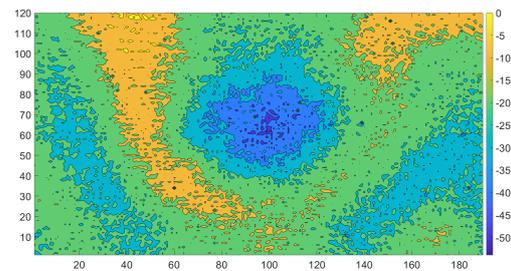
⁶Consiste en fijarnos en los valores de gris de un grupo de píxeles, hacer su valor medio y asociarlo a

píxeles de la cámara donde se promedian las medidas experimentales, por lo que pasamos de tener una matriz de 1200x1920 a tener una matriz de 120x192 superpíxeles. Debido a que las posibles inhomogeneidades en las pantallas LCoS varían suavemente, es razonable tomar promedios en cada superpíxel.

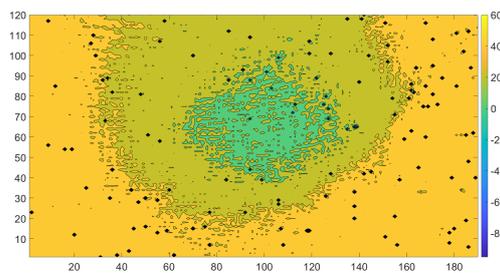
Si tenemos en cuenta todo lo que acabamos de comentar y volvemos a realizar los mapas



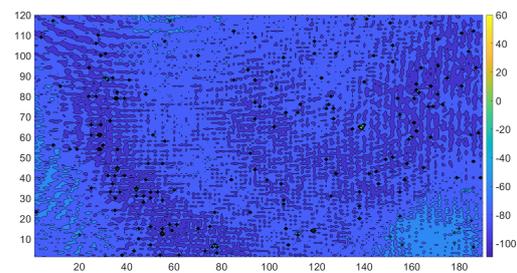
(a) Nivel de Gris 1.



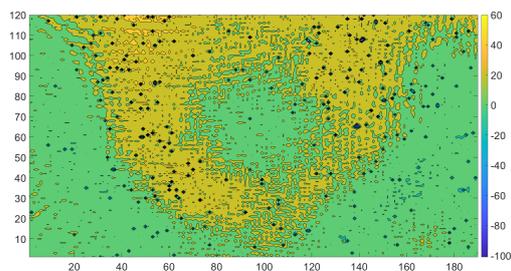
(b) Nivel de Gris 50.



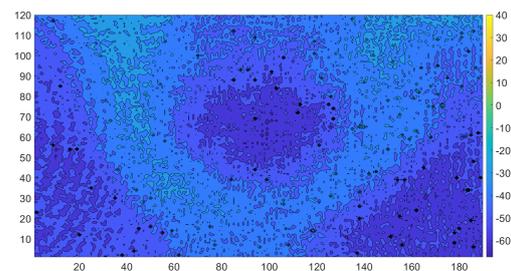
(c) Nivel de Gris 100.



(d) Nivel de Gris 150.



(e) Nivel de Gris 200.



(f) Nivel de Gris 250.

Figura 31: Retardo lineal para 120x192 superpíxeles para distintos niveles de gris.

de contorno, obtenemos la Figura 31. Tal y como se observa en esta figura, el retardo sí que sufre unas pequeñas variaciones. Este resultado nos indica que hay pequeñas variaciones en el grosor de la capa de cristal líquido de la pantalla LCoS. El fabricante no un solo píxel, que llamamos superpíxel.

proporciona el valor del grosor, pero éste acostumbra a ser de unos $3 \mu\text{m}$ en las pantallas LCoS actuales. Es lógico pensar que en el proceso de fabricación a nivel industrial de estas pantallas, se tienen pequeños rangos de tolerancia en el grosor y plenitud de la capa de cristal líquido. Al trabajar con luz en el rango visible, pequeñas variaciones en el grosor repercuten fácilmente en el desfase de la luz, tal y como muestran nuestras medidas.

Destacar que en las superficies aparecen algunos puntos que presentan cambios más drásticos de retardo, pero ocurre para un solo píxel, mientras que los que tienen alrededor no presentan ese comportamiento, por lo que este tipo de puntos los podemos asociar a errores de medida (más detalles en el Anexo 5.3). En general, lo importante es que en conjunto, los píxeles no presentan variaciones muy grandes de retardo para un nivel de gris específico.

También es interesante saber cuál es la zona central del LCoS, y cual es su correspondencia con los superpíxeles (ver Figura 32).

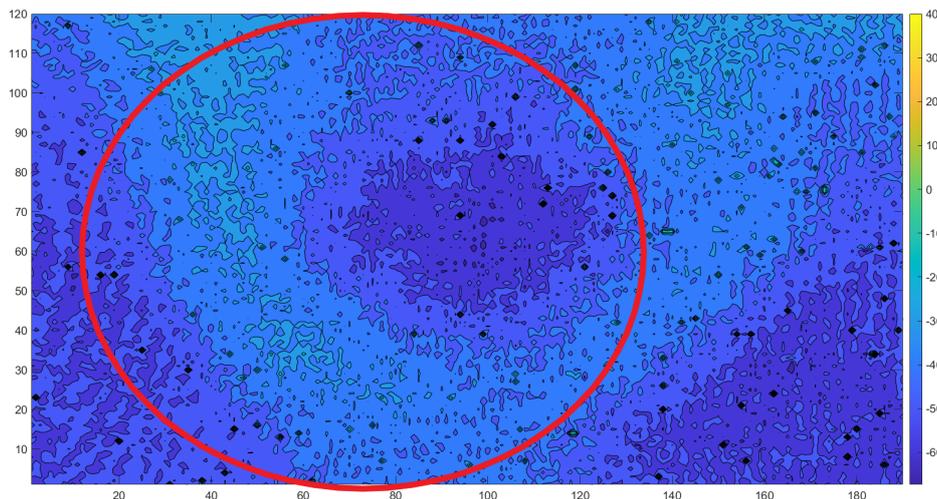


Figura 32: En esta figura, el círculo rojo representa al patrón de la imagen de calibración que habíamos mostrado en la Figura 21.

Por último, una vez que ya hemos hecho todas estas medidas, podemos comprobar lo buena que es nuestra calibración intentando predecir como se comportarían distintos tipos de luz polarizada al reflejarse en el LCoS. Esta comprobación consiste en tres pasos:

1. Realizar las medidas experimentales, tal y como hemos hecho en este TFG, para la luz linealmente polarizada a -30° , por ejemplo. Para conseguir que este tipo de luz incida sobre el LCoS, es suficiente con quitar el retardador que está antes del LCoS,

y orientar el eje de transmisión del polarizador a -30° respecto su eje vertical.

2. Calcular de forma teórica los parámetros de Stokes a partir de los datos que se han obtenido en este trabajo para la luz circularmente polarizada. Esto consiste en utilizar la matriz de Mueller con los valores que hemos calibrado anteriormente, para predecir qué estado va a tener luz linealmente polarizada a -30° en función de los niveles de gris.
3. Obtener la gráfica de los parámetros de Stokes tanto para el paso 1 como para el paso 2 (ver Figura 33), y ver qué tan parecidos son los resultados obtenidos.

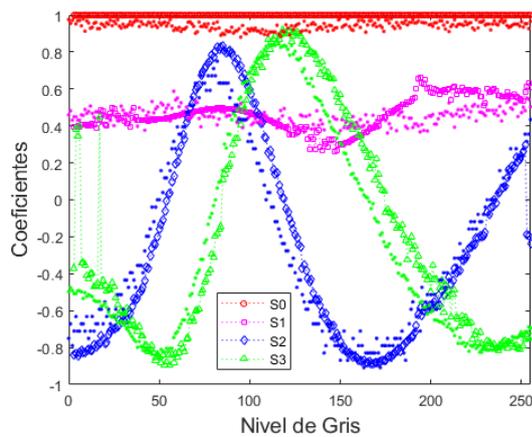
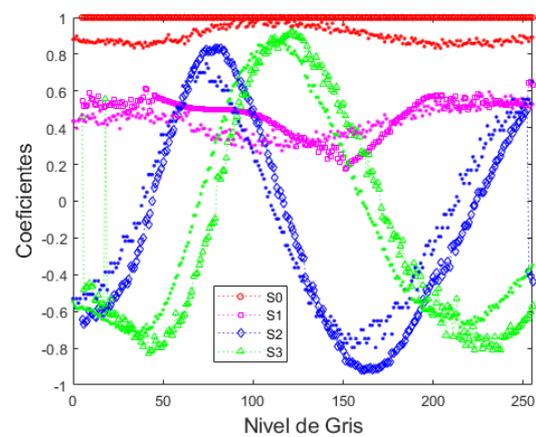
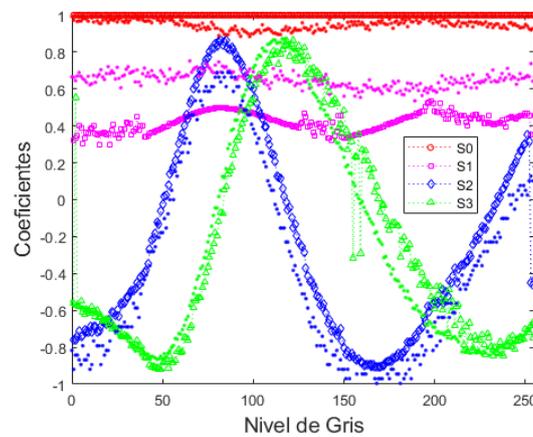
(a) *Píxel 1.*(b) *Píxel 2.*(c) *Píxel 3.*

Figura 33: Comparación de los parámetros de Stokes mediante el método experimental (puntos pequeños) y el método teórico de la matriz de Mueller (puntos grandes) para luz linealmente polarizada a -30° .

Con estas gráficas podemos concluir que hemos conseguido realizar una buena calibración para este TFG, ya que las curvas experimentales y teóricas que obtenemos son bastantes similares. Hay que destacar que el parámetro que peor se ajusta es el S_1 , y esto es debido a que este parámetro, tal y como indica la expresión (30), está directamente relacionado con la orientación del director, que como ya habíamos comentado, es un parámetro muy sensible que sufre variaciones muy pequeñas y en periodos de tiempo muy cortos. En cuanto al resto de curvas, aunque en algunas ocasiones los valores no son los mismos, la "forma" de las curvas sí se mantiene en todo momento.

4. Conclusión

Durante este trabajo, mediante un nuevo método de polarimetría de imagen utilizando los parámetros de Stokes, se ha estudiado de forma más o menos precisa los principales parámetros que nos permiten calibrar una micropantalla de cristal líquido en silicio. Este método que se ha utilizado, ha permitido conocer estos parámetros en cualquiera de los píxeles de la cámara y estudiar su comportamiento en función de los niveles de gris que se envían al LCoS. Para demostrar esto, se ha comprobado como tres píxeles presentan un comportamiento muy similar para el retardo, orientación del director y *flicker*. Además, también se ha visto como todos los píxeles se comportan de manera similar al medir el retardo que introducen para un nivel de gris en concreto. Y, por último, se ha conseguido predecir los parámetros de Stokes para un determinado tipo de luz polarizada utilizando los valores calibrados mediante este método.

Sin embargo, este método no es perfecto, tal y como se ha podido observar a lo largo del TFG. Una de las principales fuentes de error son, por ejemplo, las incertidumbres asociadas al método experimental de medida, es decir, a la hora de alinear el montaje óptico. A lo largo de la realización del experimento, se ha comprobado que los resultados pueden variar mucho con la posición angular respecto al eje vertical de los retardadores y polarizadores, de forma que se hace necesario ser cuidadosos a la hora de colocar los grados de estos elementos ópticos, ya que la mínima variación puede estropear las medidas. También hay que destacar que el experimento está afectado, tal y como se ha ido comentando en el trabajo, por efectos no deseados como ruido de los propios instrumentos de medida, efectos de difracción debidos a la gran cantidad de elementos ópticos utilizados para realizar el montaje y efectos del propio cristal líquido.

Algunas ideas de cómo mejorar el experimento pueden ser, por ejemplo:

- Utilizar imágenes con una mayor profundidad de bits.
- A la hora de trabajar con las medidas, tal y como se ha podido observar, se obtienen datos que son claramente errores de los instrumentos de medición. Si se eliminan estos datos erróneos, se puede mejorar la precisión de los cálculos.
- Realizar las medidas para distintas longitudes de onda.

Por lo tanto, este nuevo método de calibración de pantallas de cristal líquido presenta resultados muy prometedores que no sólo nos permitirán calibrar este tipo de dispositivos de formas más rápidas y precisas, sino que también nos va a ayudar a comprender mejor las propiedades físicas de los cristales líquidos y cómo se comportan ante distintas situaciones,

que nos ayudará a refinar y desarrollar métodos que aprovechen mejor estos dispositivos. Para concluir el trabajo, es interesante destacar que en nuestro experimento se aplica un mismo voltaje a todos los píxeles del LCoS. Lo interesante de cara a aplicaciones de modulación espacial de frentes de onda, es ser capaces de aplicar distintos voltajes a los distintos píxeles. Haciendo esto, lo que se quiere conseguir es que cada una de las moléculas sufra una rotación debido al campo eléctrico distinta, por lo que cada molécula introducirá un retardo distinto a la luz incidente. Con esto se puede controlar localmente qué retardo introducen las moléculas de LC a la luz, o lo que es lo mismo, se podría modificar el frente de onda localmente. Sin embargo, actualmente esto presenta varios problemas, aunque el principal es que no se puede aplicar un voltaje a un píxel de forma que sea totalmente independiente de los píxeles vecinos, tal y como ya se había comentado con los efectos de *Cross-Talk*. El análisis de estas situaciones más complejas podría ser un tema de trabajo futuro.

5. Anexo

En este apartado vamos a explicar algunas partes importantes de los programas de ordenador que hemos utilizado para la realización del TFG.

5.1. Programa para el análisis de las imágenes:

En primer lugar, lo que hacemos es asociarle a las distintas imágenes una matriz:

```

3 PathFolder='C:\Users\adria\Desktop\TFG\Programas_Imágenes\'
4 [A] = f_CrearMatriz_Imag(PathFolder);
5 [B] = f_CrearMatriz_Imag(PathFolder);
6 [C] = f_CrearMatriz_Imag(PathFolder);
7 [D] = f_CrearMatriz_Imag(PathFolder);

```

Figura 34: La función "f_CrearMatriz_Imag" me permite crear una matriz asociada a una imagen, donde cada elemento de la matriz representa la intensidad de un píxel expresado en niveles de gris. Las matrices A, B, C y D corresponden a las matrices asociadas a las orientaciones -90° , -45° , 30° y 60° respectivamente de la lámina retardadora.

Con estas líneas de código, lo que acabamos obteniendo son cuatro matrices multidimensionales asociadas a las cuatro orientaciones de la lámina retardadora, y donde cada una de ellas está formada por 256 matrices, correspondientes a 256 niveles de gris.

En segundo lugar, nos creamos vectores columna que van a contener las intensidades expresadas como niveles de gris para un determinado píxel.

```

15 for i=1:257
16     Int1(i)=A(a,b,i);
17     Int2(i)=B(a,b,i);
18     Int3(i)=C(a,b,i);
19     Int4(i)=D(a,b,i);
20 end

```

Figura 35: Introducimos dentro de cada vector columna los valores de intensidad asociados al píxel de coordenadas (a, b) para cada uno de los niveles de gris que enviamos al LCoS.

Podemos juntar los cuatro vectores columnas en una matriz de 256×4 :

```

21 Int(:,1)=Int1;
22 Int(:,2)=Int2;
23 Int(:,3)=Int3;
24 Int(:,4)=Int4;

```

Figura 36: Nos creamos una matriz que contiene las intensidades asociadas a un píxel concreto para todos los niveles de gris y para las cuatro orientaciones.

Antes de empezar a hacer los cálculos para obtener los distintos parámetros que caracterizan a un LCoS, definimos algunos elementos de interés:

- Matrices de Mueller por reflexión en un espejo:

```

33 Inversion=[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,-1,0;0,0,0,-1];
34 Identidad=[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
35 InvHelicity=[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,-1];

```

Figura 37: Matrices de Mueller asociadas a la reflexión en un espejo.

- Ángulos de los distintos elementos ópticos del montaje experimental:

```

36 inLPDeg(1) = -45; outLPDeg(1) = 0; giroDegwpin(1) = 0; retDegwpin(1) = 90; giroDegwpout(1) = -90; retDegwpout(1) = 90;
37 inLPDeg(2) = -45; outLPDeg(2) = 0; giroDegwpin(2) = 0; retDegwpin(2) = 90; giroDegwpout(2) = -45; retDegwpout(2) = 90;
38 inLPDeg(3) = -45; outLPDeg(3) = 0; giroDegwpin(3) = 0; retDegwpin(3) = 90; giroDegwpout(3) = 30; retDegwpout(3) = 90;
39 inLPDeg(4) = -45; outLPDeg(4) = 0; giroDegwpin(4) = 0; retDegwpin(4) = 90; giroDegwpout(4) = 60; retDegwpout(4) = 90;

```

Figura 38: Ángulos asociados a las dos láminas retardadoras y los dos polarizadores lineales. Destacar que para las láminas retardadoras indicamos tanto el ángulo respecto el eje vertical como el desfase que introducen. Además, *inLPDeg* y *Degwpin* se refieren al polarizador y lamina retardadora de entrada respectivamente (los que están delante del LCoS), y, por lo tanto, *outLP-Deg* y *Degwpout* se refieren a los de salida (detrás del LCoS).

Con todo esto definido, podemos realizar los cálculos:

```

40 coef0ini = ((5+3*sqrt(3))*Int(:,1)+(3+2*sqrt(3))*Int(:,2)+(2+sqrt(3))*(Int(:,3)+Int(:,4)))/(12+7*sqrt(3));
41 coef2ini = ((7+4*sqrt(3))*Int(:,1)-(3+2*sqrt(3))*Int(:,2)-(2+sqrt(3))*(Int(:,3)+Int(:,4)))/(12+7*sqrt(3));
42 % normalizamos los valores de intensidad medidos y volvemos a recalcular los coeficientes para que salgan normalizados
43 coefttotal = 2*(coef0ini-coef2ini);coefttotalnorm = coefttotal/max(coefttotal);
44 Int = Int./repmat(coefttotal,1,4);
45 Int = Int.*repmat(coefttotalnorm,1,4); % consideramos normalización global
46 ItotalPSI = Int(:,1) + Int(:,2) + Int(:,3) + Int(:,4);
47
48
49 [ PSD1, invPSD1, CN1, errorS1, EWW1 ] = funPSD( outLPDeg, giroDegwpout, retDegwpout );
50 errorIntensity = 0.001*ones(length(outLPDeg),1); % consideramos un ruido aditivo gaussiano en el fotodetector del 0.1%
51
52 [ Stokes1, errorStokes1, DOP1 ] = funPolarim( invPSD1, Int', errorIntensity, errorS1 );
53
54
55 giroDegLCoSPSIRHC = 0.5*rad2deg(atan(Stokes1(2,:)./Stokes1(3,:)));
56 lista1 = atan2(sqrt(Stokes1(2,:).^2+Stokes1(3,:).^2),Stokes1(4,:));
57 lista2 = atan2(sqrt(Stokes1(2,:).^2+Stokes1(3,:).^2),-Stokes1(4,:));
58 AvgRetPSIRHC = rad2deg(fununwrap180(funbranch180(lista2,lista1)))+720;
59 AvgRetEn = mod(AvgRetPSIRHC, 180);
60 DOPPSIRHC = sqrt(Stokes1(2,:).^2+Stokes1(3,:).^2+Stokes1(4,:).^2)./Stokes1(1,:);
61 SemifluctPSIRHC = flickerAmp(DOPPSIRHC*100);
62
63 giroGrados1=giroDegLCoSPSIRHC; desfaseGrados=AvgRetPSIRHC;
64 muestraGrados = [min(desfaseGrados):1:300,420:1:480,600:1:660,780:1:max(desfaseGrados)];
65 muestraGiroDegLCoS = interp1(desfaseGrados,giroGrados1,muestraGrados);
66 giroGradosinterpPSIRHC = interp1(muestraGrados,muestraGiroDegLCoS,desfaseGrados,'linear');

```

Figura 39: En las líneas 40-45 realizamos la normalización de los valores de intensidad. En la línea 52, aplicando una función calculamos los parámetros de Stokes, que los utilizamos para calcular la orientación del director (línea 55), el retardo desenrollado (línea 58) ó enrollado (línea 59), la amplitud del flicker (línea 61) y la interpolación en las líneas 63-66.

En cuanto a las superficies de contorno, utilizando un bucle como el de la Figura 40, somos capaces de trabajar con más de un píxel al mismo tiempo.

Una vez que hemos definido el rango de píxeles con el que queremos trabajar, simplemente debemos aplicarles a todos ellos las expresiones de la Figura 39. Tras ello, lo que hacemos es meter todos los valores del retardo en una matriz vacía (ver Figura 41).

Y podemos representar las superficies de contorno aplicando un *contourf*.

```

13 -
14 - for k=575:625
15 -     for j=900:1000
16 -         a = k;
17 -         b = j;
18 -
19 -         Int = zeros(257,4);
20 -         Int1 = zeros(257,1);
21 -         Int2 = zeros(257,1);
22 -         Int3 = zeros(257,1);
23 -         Int4 = zeros(257,1);
24 -
25 -     for i=1:257
26 -         Int1(i)=A(a,b,i);
27 -         Int2(i)=B(a,b,i);
28 -         Int3(i)=C(a,b,i);
29 -         Int4(i)=D(a,b,i);
30 -     end
31 -
32 -     Int(:,1)=Int1;
33 -     Int(:,2)=Int2;
34 -     Int(:,3)=Int3;
35 -     Int(:,4)=Int4;

```

Figura 40: Bucle que me permite obtener una pequeña matriz contenida en la matriz asociada a un nivel de gris.

```

86 -
87 - for i=1:257
88 -     J(a1,b1,i)=AvgRetPSIRHC(i);
89 - end

```

Figura 41: Creamos una matriz con los valores del retardo del conjunto de píxeles que estamos estudiando para todos los niveles de gris.

La pendiente del retardo puede ser positiva o negativa debido a las operaciones matemáticas, pero físicamente hablando esto no es importante, por lo que nos interesa que tenga pendiente negativa para comparar con la referencia (Figura 19). Esto lo podemos controlar de forma sencilla utilizando lo siguiente:

```

82 - AvgRetPSIRHC = rad2deg(fununwrap180(funbranch180(lista1,lista2)))+720;
83 - if AvgRetPSIRHC(1) - AvgRetPSIRHC(200) < 0
84 -     AvgRetPSIRHC = rad2deg(fununwrap180(funbranch180(lista2,lista1)))+720;
85 - end

```

Figura 42: Estas líneas de código permiten controlar y ajustar de forma automática la pendiente del retardo lineal.

Para utilizar superpíxeles, los creamos de la siguiente forma:

```

8   for i_1=1:257
9       for j_1=1:120
10          for k_1=1:192
11              A(j_1, k_1,i_1)=mean(A1(j_1*10,k_1*10,i_1),'all');
12              B(j_1, k_1,i_1)=mean(B1(j_1*10,k_1*10,i_1),'all');
13              C(j_1, k_1,i_1)=mean(C1(j_1*10,k_1*10,i_1),'all');
14              D(j_1, k_1,i_1)=mean(D1(j_1*10,k_1*10,i_1),'all');
15          end
16      end
17  end

```

Figura 43: En este caso, estamos utilizando todos los píxeles de la pantalla.

Por último, para hacer la predicción de la polarización de la luz mediante los datos obtenidos por la calibración, aplicamos la siguiente función:

```

22
23 -   inLP=inLPGrados*pi/180;
24 -   LPin = [1;cos(2*inLP);sin(2*inLP);0]; % Stokes vector Polarización lineal a inLPGrados
25
26 -   Mwpin = MatrizMueller('waveplate', giroGradoswpin, desfaseGradoswpin, 0);
27 -   PSG = Mwpin*LPin;
28
29 -   % parámetros procedentes de la calibración del LCoS
30 -   % giroGradosLCoS = 0;
31 -   % desfaseGrados=AvgRet;
32 -   % flickGrados=Semifluct;
33
34 -   Ml = MatrizMueller('lcosflicker', giroGradosLCoS, desfaseGrados, flickGrados);
35 -   StokesLCoS = Inversion*Ml*PSG; % transmisión intensidad incluido flicker
36
37 -   DOP = sqrt(StokesLCoS(2).^2+StokesLCoS(3).^2+StokesLCoS(4).^2)./StokesLCoS(1);
38
39 -   end

```

Figura 44: Con esta función obtenemos los parámetros de Stokes a partir del producto de la matriz asociada a la luz polarizada que queremos predecir por la matriz de Mueller, donde usamos los valores del calibrado.

Para ver de forma más sencilla y visual el funcionamiento del algoritmo utilizado para el análisis de los datos medidos, podemos utilizar un diagrama de flujo:

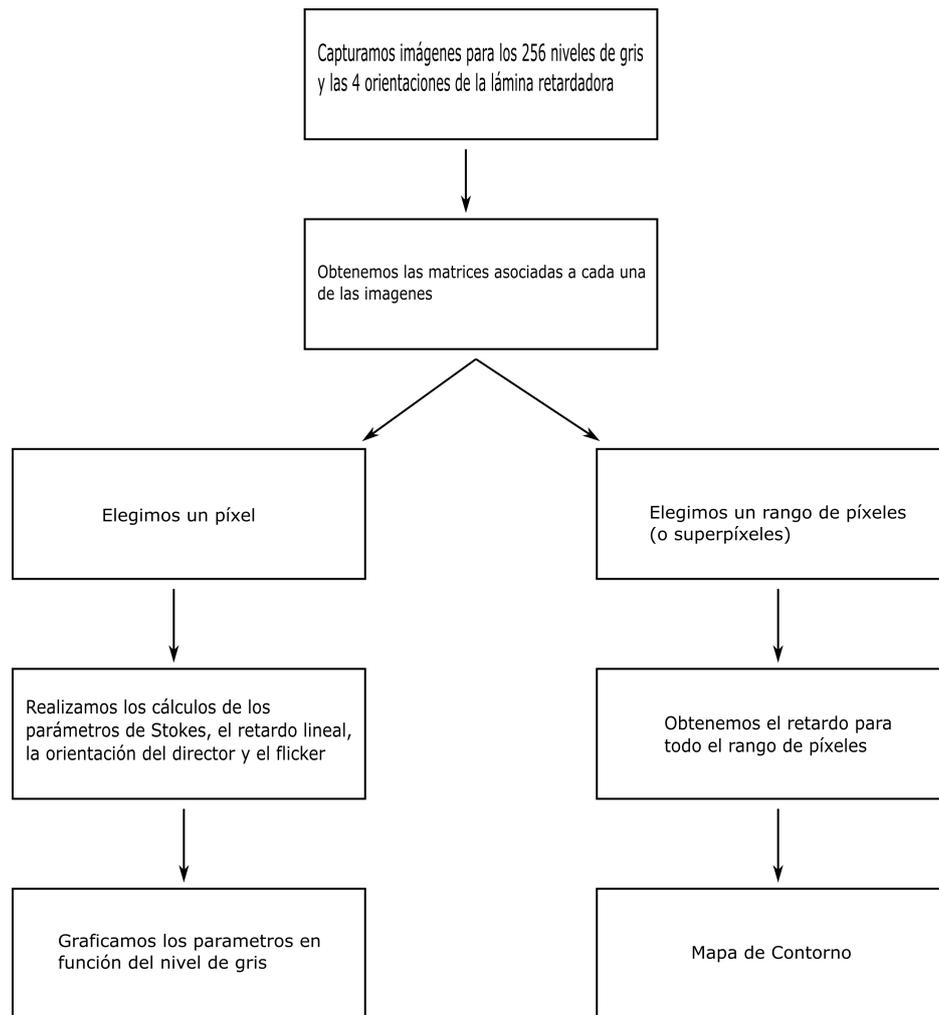


Figura 45: Diagrama de flujo que simplifica el algoritmo del programa de MatLab.

5.2. Automatización de la toma de medidas mediante programación en entorno LabView:

Como ya hemos comentado en el TFG, para realizar las distintas medidas se ha utilizado un programa realizado en el entorno LabView. Este programa nos permite controlar con el ordenador los distintos instrumentos que intervienen en el experimento, en concreto, el LCoS y la cámara.

Tal y como se puede observar en la imagen del diagrama de bloques, podemos diferenciar dos partes fundamentales del programa:

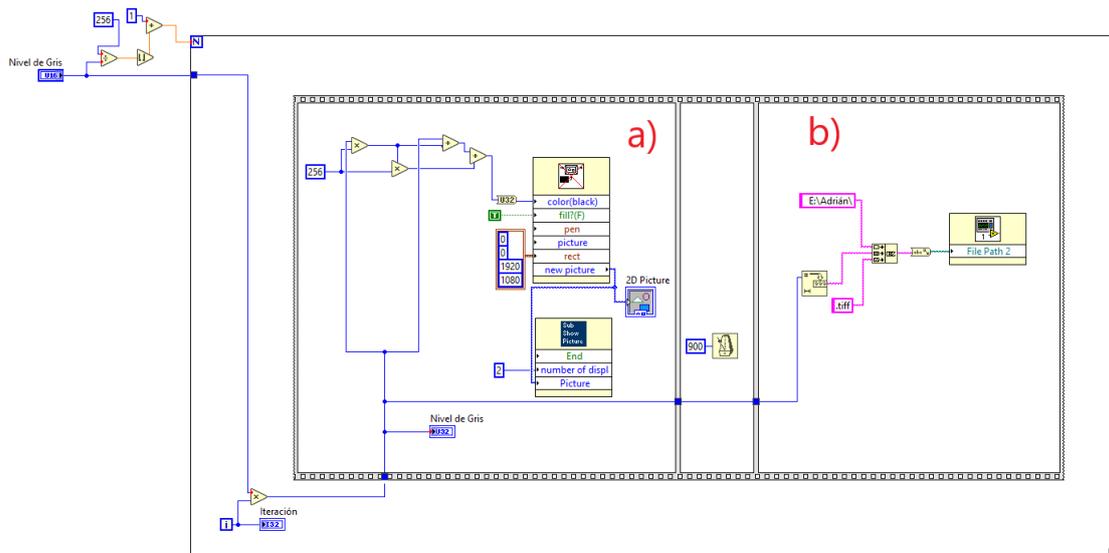


Figura 46: Diagrama de bloques del código que configura el LCoS y la cámara.

- a) En este primer bloque, simplemente se configura el LCoS y se eligen los niveles de gris que le llegarán durante el experimento, es decir, entre 0 y 256 podemos decidir cuanto niveles de gris queremos mandar a la micropantalla. En este trabajo, siempre le enviamos los niveles de gris de uno en uno.
- b) En el segundo bloque, se configura la cámara.

En el segundo bloque es interesante ver en que consiste un poco el modulo utilizado. Para ello, vamos a analizar su diagrama de bloques:

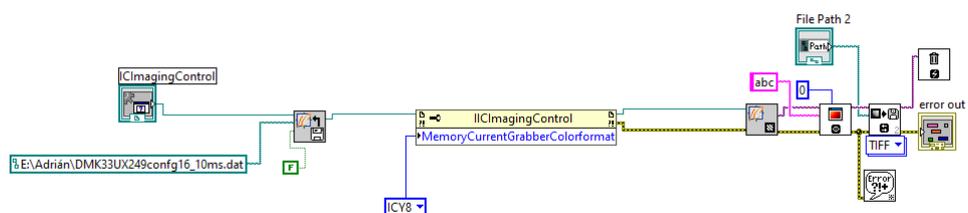


Figura 47: Diagrama de bloques del módulo que se encarga de la captura de imágenes de forma automática mediante la cámara.

En este caso, para poder realizar la capturas de las imágenes y guardarlas en el ordenador, hemos decidido utilizar las librerías IMAQ, que son una de las varias opciones que tenemos para tratar con imágenes en LabView. En este código, lo que se hace es elegir el formato

que tendrán las imágenes capturadas (en nuestro casos son tiff de 8 bits). Además, también le indicamos el nombre que el programa le debe poner a la foto y el directorio en el que las tiene que guardar.

5.3. Errores de las medidas asociados a la cámara y el LCoS

Durante todo el trabajo hemos estado hablando de errores de medida por parte de la cámara, como por ejemplo el ruido. Vamos a explicar un poco mejor en qué consisten exactamente estos errores [27, 28].

Todo tipo de detector tiene fuentes de ruido asociadas al proceso de captación. Estos fenómenos físicos son inherentes al proceso de medida, y se pueden caracterizar y modelar para minimizarlos y optimizar la toma de medidas, o incluso mejorar el diseño de la cámara y el sensor.

Puesto que el sensor de captación es un dispositivo semiconductor y que la interacción del fotón con el material se realiza mediante el efecto fotovoltaico, algunos electrones obtienen la energía suficiente por agitación térmica para saltar de la banda de valencia a la de conducción, y, entonces, estos electrones son extraídos y leídos por el sistema de captura como señal. Esto es el ruido térmico, que siempre está presente. Obviamente, cuanto mayor sea la temperatura del dispositivo, también es mayor este tipo de ruido. A pesar de que existen métodos para intentar eliminarlo, como por ejemplo, tomar una imagen con el sensor tapado y restarle el resultado a las imágenes de las medidas tomadas, este ruido es aleatorio y prácticamente imposible de eliminarlo por completo. En general, la mejor forma de minimizarlo es con una buena refrigeración. Además, puesto que este ruido sigue la estadística de Poisson, se tienen modelos que discriminan la señal frente al ruido y pueden estimar la señal-ruido del sistema.

Otras fuentes de ruido del sensor son, por ejemplo, el carácter discreto de la radiación incidente (ruido *shot-noise*), el debido al amplificador interno del sistema de captura de imágenes (ruido *read-noise*), los debidos a la linealidad de la respuesta de la cámara (se busca que los electrones generados sean proporcionales a los fotones incidentes) y el ruido de cuantización (siempre es mejor trabajar con mayor cantidad de bits porque se aumenta la sensibilidad del sistema).

En el apartado de los mapas de contorno (Figura 31) asociamos los valores de determinados píxeles aislados a errores de medida. Estos errores pueden tener distintas causas y sería necesario hacer un estudio más exhaustivo para saber la causa exacta. Algunas de las posibilidades son píxeles que no funcionen correctamente, ya que si nos fijamos, la mayoría de esos píxeles se repiten en todas las superficies de contorno de la Figura 31. También

podría ser por algunos de los elementos ópticos que se mantienen estáticos durante las medidas, el pixelado del LCoS, el sensor de la cámara, algo de suciedad de los elementos ópticos, etc.

5.4. Matriz de reflexión asociada al dispositivo LCoS

La matriz de reflexión para un dispositivo LC se puede definir como:

$$M_{reflex} = M_b J M_f \quad (31)$$

Además, por definición también sabemos que $M_b = J(M_f)^T J$ [24]. Si el dispositivo LC trabaja en reflexión y los caminos de ida y de vuelta son iguales, la matriz del dispositivo es equivalente a un retardador lineal rotado. Con todo esto podemos escribir lo siguiente:

$$\begin{aligned} (M_f)^T &= [M_{Rot}^T(\theta) M_R(\Gamma, 0^0) M_{Rot}^T(\theta)] M_{Rot}^T(\Omega) = \\ &= [M_{Rot}(-\theta) M_R(\Gamma, 0^0) M_{Rot}(\theta)] M_{Rot}(-\Omega) \end{aligned} \quad (32)$$

Entonces:

$$M_b = J(M_f)^T J = J [M_{Rot}(-\theta) M_R(\Gamma, 0^0) M_{Rot}(\theta)] M_{Rot}(-\Omega) J \quad (33)$$

Sustituyendo en M_{reflex} queda:

$$M_{reflex} = (J [M_{Rot}(-\theta) M_R(\Gamma, 0^0) M_{Rot}(\theta)] M_{Rot}(-\Omega) J) J (M_{Rot}(\Omega) [M_{Rot}(-\theta) M_R(\Gamma, 0^0) M_{Rot}(\theta)]) \quad (34)$$

Si simplificamos esta expresión llegamos a la ecuación (20).

Referencias

- [1] J. Hecht, (2017). *Óptica* (5a. ed.). Pearson Educación.
- [2] R. Fuentes, (2020). *Óptica 1*. Universidad de Alicante.
- [3] J. Hernández, (22 de mayo de 2017). *Polarización*. Julio Hernández Fotografía. <https://www.juliohernandezfotografia.cl/polarizacion>.
- [4] J. San Segundo, (2019). *Polarización 2da parte*. SlidePlayer. <https://slideplayer.es/slide/15776136/>
- [5] G. Lazarev, P.-J. Chen, J. Strauss, N. Fontaine, and A. Forbes. "Beyond the display: phase-only liquid crystal on Silicon devices and their applications in photonics", *Opt. Express* 27, 16206 (2019).
- [6] S. T. Wu and D. K. Yang, *Reflective Liquid Crystal Displays* (John Wiley Sons Inc., Chichester, 2005).
- [7] N. Collings, T. Davey, J. Christmas, D. Chu, and B. Crossland, "The applications and technology of Phase-Only Liquid Crystal on Silicon Devices", *J. Disp. Tech.* 7(3), 112–119 (2011).
- [8] I. Moreno, C. Iemmi, A. Márquez, J. Campos, and M. J. Yzuel, "Modulation light efficiency of diffractive lenses displayed in a restricted phase-mostly modulation display," *Appl. Opt.* 43(34), 6278–6284 (2004).
- [9] J. E. Wolfe and R. A. Chipman, "Polarimetric characterization of liquid-crystal-on-silicon panels," *Appl. Opt.* 45(8), 1688–1703 (2006).
- [10] A. Lizana, I. Moreno, C. Iemmi, A. Márquez, J. Campos, and M. J. Yzuel, "Time-resolved Mueller matrix analysis of a liquid crystal on silicon display," *Appl. Opt.* 47(23), 4267–4274 (2008).
- [11] A. Lizana, A. Márquez, L. Lobato, Y. Rodange, I. Moreno, C. Iemmi, and J. Campos. "The minimum Euclidean distance principle applied to improve the modulation diffraction efficiency in digitally controlled spatial light modulators", *Opt. Express* 18, 10581 (2010).
- [12] H. Yang and D. P. Chu. "Phase flicker in liquid crystal on silicon devices", *J. Phys. Photon.* 2, 032001 (2020).

- [13] H. M. P. Chen, J. P. Yang, H. T. Yen, Z. N. Hsu, Y. Huang, and S. T. Wu. "Pursuing High Quality Phase-Only Liquid Crystal on Silicon (LCoS) Devices", *Appl. Sci.* 8, 2323 (2018).
- [14] T. Lu, M. Pivnenko, B. Robertson, and D. Chu. "Pixel-level fringing-effect model to describe the phase profile and diffraction efficiency of a liquid crystal on silicon device", *Appl. Opt.* 54, 5903 (2015).
- [15] A. Lizana, I. Moreno, A. Márquez, C. Iemmi, E. Fernández, J. Campos, and M. J. Yzuel. "Time fluctuations of the phase modulation in a liquid crystal on silicon display: characterization and effects in diffractive optics", *Opt. Express* 16, 16711 (2008).
- [16] R. Li and L. Cao. "Progress in Phase Calibration for Liquid Crystal Spatial Light Modulators", *Appl. Sci.* 9, 2012 (2019).
- [17] J. E. Wolfe and R. A. Chipman. "Polarimetric characterization of liquid-crystal-on-silicon panels", *Appl. Opt.* 45, 1688 (2006).
- [18] F. J. Martínez, A. Márquez, S. Gallego, J. Francés, and I. Pascual. "Extended linear polarimeter to measure retardance and flicker: application to liquid crystal on silicon devices in two working geometries", *Opt. Eng.* 53, 014105 (2014).
- [19] F. J. Martínez, A. Márquez, S. Gallego, J. Francés, I. Pascual, and A. Beléndez. "Retardance and flicker modeling and characterization of electro-optic linear retarders by averaged Stokes polarimetry", *Opt. Lett.* 39, 1011 (2014).
- [20] F. J. Martínez, A. Márquez, S. Gallego, M. Ortuño, J. Francés, A. Beléndez, and I. Pascual. "Averaged Stokes polarimetry applied to evaluate retardance and flicker in PA-LCoS devices", *Opt. Express* 22, 15064 (2014).
- [21] A. Márquez, F. J. Martínez-Guardiola, J. Francés, S. Gallego, I. Pascual, and A. Beléndez. "Combining average molecular tilt and flicker for management of depolarized light in parallel-aligned liquid crystal devices for broadband and wide-angle illumination", *Opt. Express* 27, 5238 (2019).
- [22] A. Márquez, F. J. Martínez-Guardiola, J. Francés, E. M. Calzado, D. Puerto, S. Gallego, I. Pascual, and A. Beléndez. "Unitary matrix approach for a precise voltage dependent characterization of reflective liquid crystal devices by average Stokes polarimetry", *Opt. Lett.* 45, 5732 (2020).

-
- [23] A. Márquez, F. J. Martínez-Guardiola, J. Francés, E. M. Calzado, D. Puerto, S. Gallego, I. Pascual, and A. Beléndez, *Voltage dependence of retardance, flicker and director angle orientation in reflective liquid crystal devices by average Stokes polarimetry*. [Diapositivas PowerPoint]. SPIE Optics + Photonics 2021. San Diego, California, United States.
- [24] C. R. Fernández-Pousa and I. Moreno, N. Bennis, C. Gómez-Reino, “Generalized formulation and symmetry properties of reciprocal nonabsorbing polarization devices: application to liquid-crystal displays”, *J. Opt. Soc. Am. A* 17, 2074 (2000).
- [25] A. Márquez, I. Moreno, J. Campos, M.J. Yzuel, “Analysis of Fabry–Perot interference effects on the modulation properties of liquid crystal displays”, *Opt. Comm* 265, 84–94 (2006).
- [26] Pantallas de cristal líquido. (5 de marzo de 2022). En Wikipedia (Imagen original del usuario Ed g2s). https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LCD_layers.svg.
- [27] Nikon, (2 de mayo de 2019). *CCD Signal-To-Noise Ratio*. MicroscopyU. <https://www.microscopyu.com/tutorials/ccd-signal-to-noise-ratio>.
- [28] European Machine Vision Association, (30 de diciembre de 2016). *Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras*. www.emva.org