

Universidad de Cantabria

Tesis Doctoral

FORMACIÓN DE IMÁGENES EN ÓPTICA ADAPTATIVA

Vidal Fernández Canales

Capítulo 10

CALIBRADO DEL DISPOSITIVO

A pesar de su evidente utilidad, existen escasos sistemas de óptica adaptativa en los observatorios astronómicos. Diversas razones explican este hecho. En primer lugar, su puesta en marcha presenta gran cantidad de problemas técnicos y conceptuales. Requiere el trabajo en equipo de expertos en áreas muy dispares (Tyson 1991). El costo de los equipos es muy importante; por ejemplo el sistema de óptica adaptativa del futuro telescopio de 10 m GTC se puede estimar en cientos de millones de pesetas sobre un total de unos 14.000 millones de pesetas (GranTeCan 1997). Por otra parte, es un campo relativamente reciente (dada su gran complejidad) que se ha desarrollado casi por completo en el último cuarto de siglo. Además los avances de los grupos involucrados en proyectos militares, sin duda los mejor financiados, se mantuvieron en secreto hasta esta

década. Por último es evidente que no existe ninguna posibilidad de éxito comercial a gran escala produciendo equipos de óptica adaptativa para telescopios.

Todos estos motivos han llevado a que los sistemas se hallen aún en fase experimental. Una lista de los sistemas de óptica adaptativa en telescopios astronómicos se puede encontrar en el trabajo de Thompson (1994). Los sistemas de óptica adaptativa del telescopio de 3.6 m del ESO en La Silla (Chile) y del US Air Force Starfire Optical Range de 1.5 m ofrecen imágenes compensadas desde hace algunos años (Milonni 1999). Otros sistemas se están desarrollando con celeridad y se puede encontrar información muy reciente sobre los logros de los diversos observatorios en sus páginas *web*. En general los sistemas corrigen con bastante precisión en el infrarrojo: los primeros resultados fueron obtenidos por Rousset et al. (1990) al resolver una binaria. Sin embargo, en el visible son escasas las imágenes con una resolución cercana al límite difraccional, como las de Primmermann et al. (1991).

Ante las dificultades de conseguir datos fiables de un sistema de óptica adaptativa instalado en un telescopio y la dificultad de su análisis, se ha optado por utilizar un dispositivo experimental que reproduzca el comportamiento de la atmósfera y del sistema de corrección. Se espera en un futuro poder contrastar los modelos propuestos con datos de sistemas reales.

Se considera que la atmósfera es un medio inhomogéneo no absorbente que sólo varía la fase de las ondas que la atraviesan. Para variar la fase del frente de onda, de forma que se emule el efecto de la atmósfera y del sistema de óptica adaptativa, se utilizan pantallas de cristal líquido. Sus principales ventajas respecto a otras alternativas son su bajo precio, su fiabilidad, diseño compacto, escaso consumo, facilidad de manejo, buena transmisión y gran número de elementos (Love et al. 1994). Los inconvenientes principales son que en general se ha de usar luz polarizada, la modulación en intensidad asociada a la modulación en fase y que los tiempos de respuesta no son muy cortos.

Existen en el mercado dispositivos específicos formados por cristales líquidos que permiten controlar el frente de onda. Se han obtenido frentes de onda que representan los primeros términos de la base de polinomios de Zernike (Love 1997, Thibos y Bradley 1997). Sin embargo se ha escogido una opción de resolución superior y precio muy inferior: las pantallas de cristal líquido que en un videoprojector sirven para formar la imagen de cada uno de los tres canales: rojo, azul y verde (ver el esquema de funcionamiento en la figura 10.1). Estos aparatos tienen un costo bajo debido al gran

número de unidades fabricadas y se utilizan en diversas aplicaciones científicas como moduladores de fase (López-Coronado et al. 1998, Vargas-Martín et al. 1998, Davis et al. 1998, Davis et al. 1999d, Moreno et al. 1998, Soutar y Lu 1994, Lu y Saleh 1990; para más información ver Refs. 1-13 de este último). Se ha demostrado que pueden generar frentes de onda que representen polinomios de Zernike, al menos hasta el término 55 (Cho 1998), por lo que son adecuados para emular un sistema de óptica adaptativa estándar. Sus desventajas son que su calidad óptica es menor y que es necesario calibrar las pantallas de cristal líquido, porque los fabricantes no ofrecen más información que el libro de instrucciones del videoprojector. Existen además otros pequeños inconvenientes. Por ejemplo para poder utilizar las pantallas lejos del proyector se han de realizar cables y conectores adecuados (ver sección 11.1.2). En el modelo que se describe en este trabajo, *SONY VPL-V500QM* se soldaron además dos resistencias a la placa para que el sistema funcionara sin su lámpara.

En este capítulo se describe brevemente qué es un cristal líquido, las características fundamentales de las pantallas de cristal líquido (Saleh 1991) y la forma de obtener dichas características en las pantallas extraídas del videoprojector, es decir, cómo calibrarlas (Moreno 1996).

En el capítulo siguiente se describe el experimento realizado y su comparación con los resultados de la simulación.

10.1 Cristales líquidos

Los materiales cuyas moléculas son de forma anisótropa se pueden presentar en un estado de la materia que tiene propiedades intermedias entre los sólidos y los líquidos. Este estado de la materia se caracteriza porque las moléculas están alineadas en una dirección determinada pero sus posiciones son aleatorias (en al menos una de las dimensiones espaciales). Por tanto, la orientación de las moléculas es ordenada como en los cristales, pero su posición no, como en los fluidos.

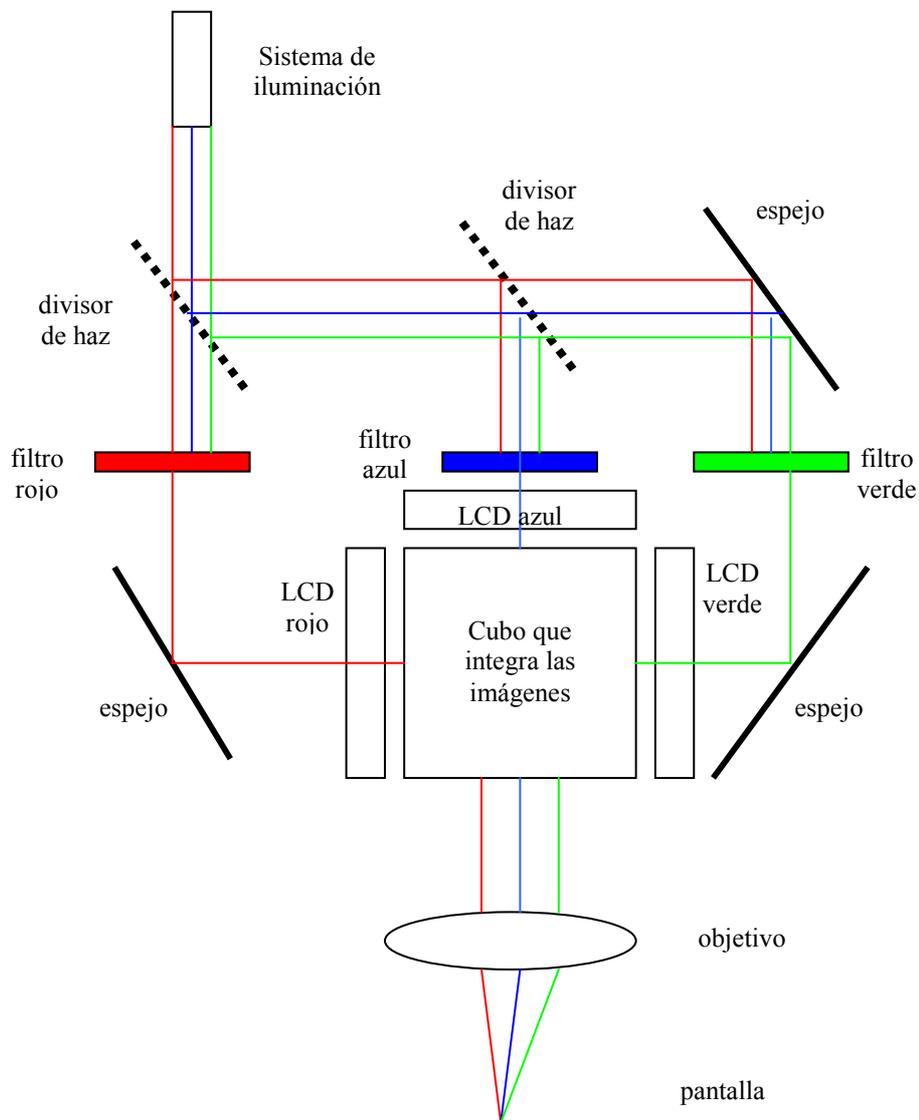


Figura 10.1 Esquema de funcionamiento de un videoprojector RGB. Mediante un sistema de iluminación y de filtros adecuado, sólo llega luz roja a una de la pantallas, azul a otra y verde a la tercera. Las pantallas tienen sendos polarizadores pegados en las caras anterior y posterior, y se puede conseguir que representen una imagen. La pantalla a la que llega luz roja representa la imagen que corresponde a la parte de la imagen final que requiere este color; la azul y la verde hacen otro tanto. El cubo integra las tres imágenes de forma que el objetivo forma sobre la pantalla la imagen final en color.

Existen tres clases (o fases) de cristales líquidos: la nemática, la esmética y la colestérica. En la fase nemática las moléculas están orientadas paralelas a un eje, pero sus posiciones son aleatorias. En la esmética las moléculas son paralelas y se agrupan en capas horizontales en las que se distribuyen aleatoriamente. La colestérica es una forma distorsionada de la nemática en la que la orientación gira helicoidalmente alrededor de un eje. Las tres fases se representan en la figura 10.2.

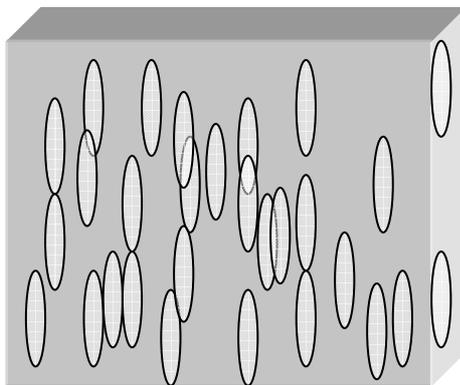
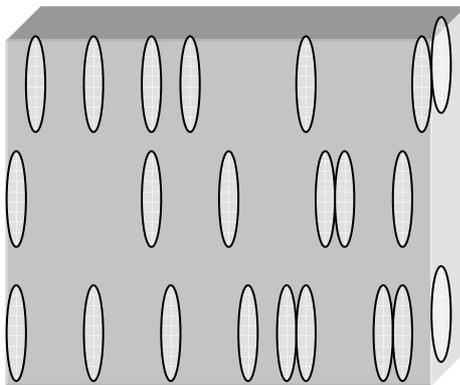
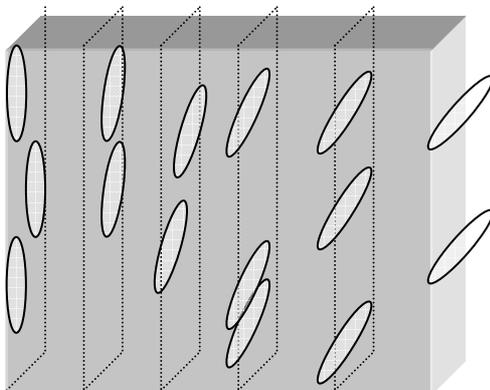
**Fase nemática****Fase esmética****Fase colestérica**

Figura 10.2 Representación de las tres fases en que se pueden presentar los cristales líquidos.

La mayor parte de dispositivos que incorporan pantallas de cristal líquido utilizan cristales nemáticos con rotación del eje de las moléculas (Kaneko 1987). Son cristales nemáticos a los que se impone por fuerzas externas (mecánicas en general) una rotación de la orientación similar a la de la fase colestérica. La forma alargada de las moléculas hace que el material sea birrefringente, actuando ópticamente cada capa como un anisótropo uniáxico. Se puede considerar al cristal líquido como una sucesión de láminas retardadoras cuyas líneas neutras están progresivamente rotadas (figura 10.3). La orientación de las moléculas se puede variar aplicando un voltaje, lo que se aprovecha para conseguir modulación de fase o rotación del plano de vibración de la luz, como se explicará más adelante.

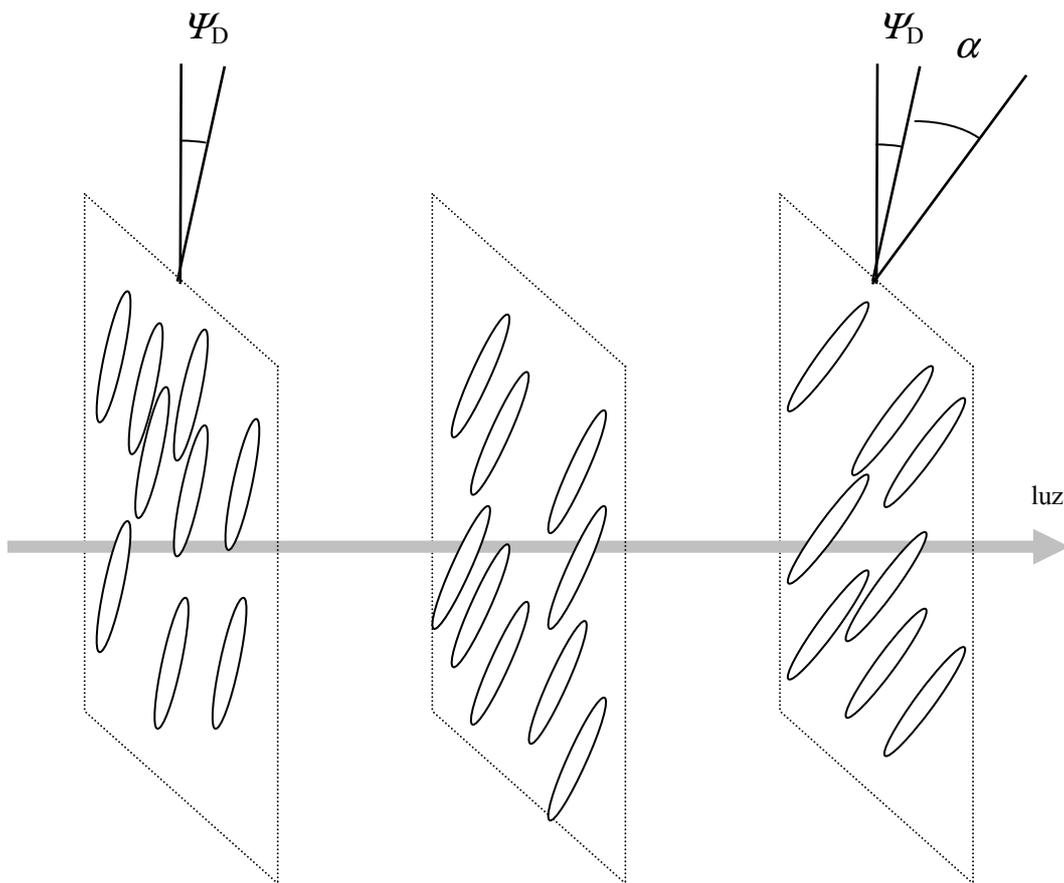


Figura 10.3 Cristal líquido en fase nemática con giro α del eje director, que en la primera superficie está inclinado un ángulo ψ_D respecto a la vertical.

En la figura 10.4 se observa la orientación de las moléculas del cristal para diversas situaciones del voltaje aplicado. La dirección z es la de propagación de la luz. Si no existe voltaje aplicado la estructura helicoidal permanece intacta, idéntica a la de la figura 10.3. Con un voltaje intermedio, las moléculas tienden a alinearse en la dirección del campo. Con un voltaje suficientemente alto todas las moléculas se alinean con el campo y desaparece la estructura helicoidal: la celda de cristal líquido se comporta como isotrópica para luz en la dirección z del campo.

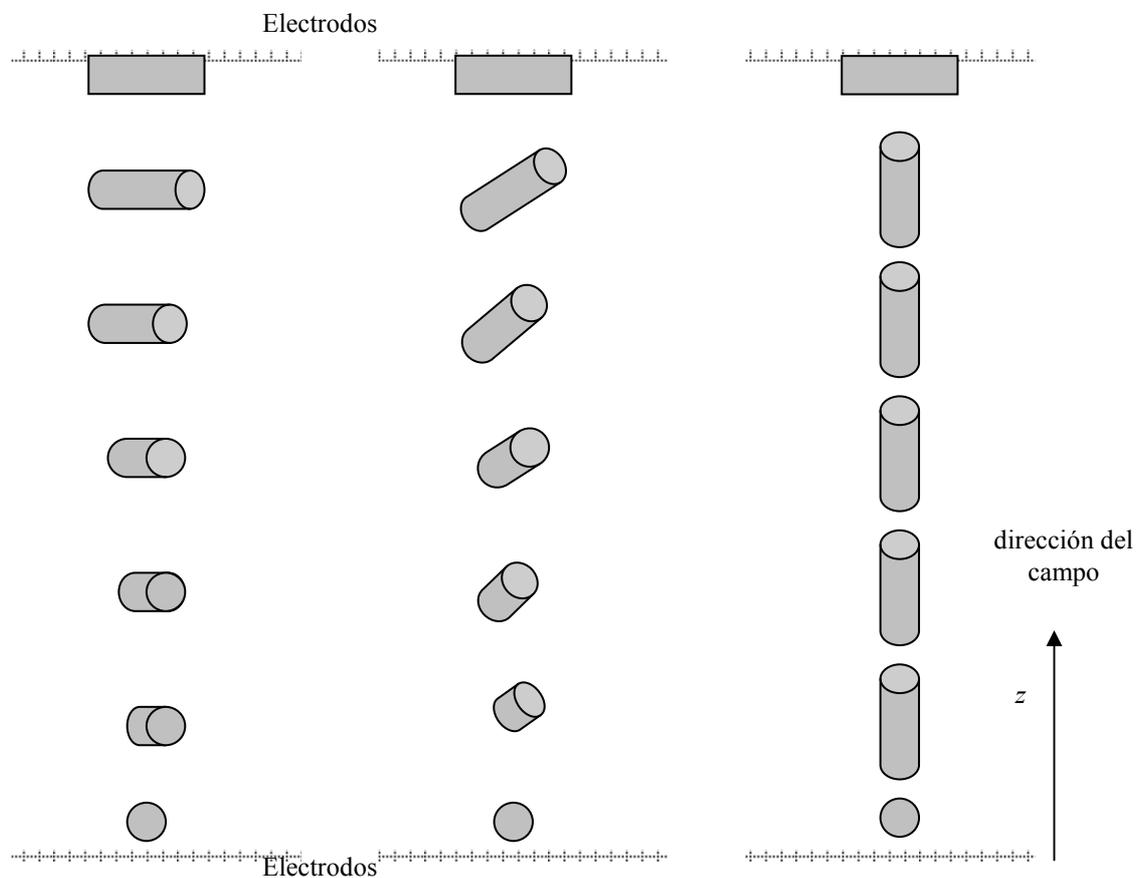


Figura 10.4 Orientación de las moléculas de la celda de cristal líquido para varias situaciones de voltaje aplicado: a la izquierda, voltaje nulo, en el centro voltaje intermedio y a la derecha voltaje muy alto.

10.1.1 Parámetros que caracterizan los cristales nemáticos

Existen tres parámetros fundamentales para caracterizar este tipo de pantallas de cristal líquido. La primera magnitud fundamental es el ángulo α que rota el eje respecto al cual se orientan las moléculas (eje director). En la figura 10.3 se muestra gráficamente este parámetro. Otra magnitud fundamental es el ángulo Ψ_D que forma el eje director de la primera superficie del cristal con la vertical (se supone que la luz incide perpendicular a los ejes de las moléculas, ver figura 10.3). Variando el alineamiento del director se pueden obtener distintos resultados como se explicará en apartados posteriores. Una última magnitud fundamental es la diferencia entre los índices de refracción extraordinario y ordinario, denominada birrefringencia, que depende de la longitud de onda de la luz incidente y del voltaje aplicado.

10.2 Modelo de la celda de cristal líquido

En este apartado se describe el efecto de la celda sobre la luz que la atraviesa, haciendo uso del formalismo matricial de Jones. Se sigue el modelo propuesto por Lu y Saleh (1990). El modelo consiste en dividir la celda en una serie infinita de láminas retardadoras cuyos ejes van rotando, y hallar la matriz de Jones de la celda como producto de las correspondientes a estas láminas (Yariv y Yeh 1984). Se consideran dos aproximaciones:

- 1) El ángulo de rotación del eje óptico a lo largo de la dirección z de propagación de la luz es lineal con la distancia.
- 2) Cuando se aplica un voltaje todas las moléculas se inclinan un mismo ángulo θ sobre el eje z , igual a (Gennes 1975):

$$\theta = \begin{cases} 0 & V < V_c \\ \frac{\pi}{2} - 2 \arctg \left[\exp \left(-\frac{V - V_c}{V_0} \right) \right] & V > V_c \end{cases} \quad (10.1)$$

donde V_c es un voltaje mínimo por debajo del cual las moléculas no se inclinan y V_0 es un constante. El índice de refracción del rayo extraordinario $n_e(\theta)$ depende de la inclinación de las moléculas y se puede obtener de:

$$\frac{1}{n_e^2(\theta)} = \frac{\cos^2(\theta)}{n_e^2} + \frac{\sin^2(\theta)}{n_o^2} \quad (10.2)$$

La matriz de Jones que describe el efecto de la celda es (Lu y Saleh 1990, Moreno 1996):

$$M(\theta) = \exp(j\beta(\theta)/2) R(\theta) \begin{pmatrix} \cos(\chi(\theta)) - j \frac{\beta(\theta)}{2} \frac{\sin(\chi(\theta))}{\chi(\theta)} & -\alpha \frac{\sin(\chi(\theta))}{\chi(\theta)} \\ \alpha \frac{\sin(\chi(\theta))}{\chi(\theta)} & \cos(\chi(\theta)) + j \frac{\beta(\theta)}{2} \frac{\sin(\chi(\theta))}{\chi(\theta)} \end{pmatrix} \quad (10.3)$$

donde R es la matriz rotación y β es el desfase entre el rayo ordinario y el extraordinario, que se expresa en función de la longitud l de la celda, de la longitud de onda y de la birrefringencia como:

$$\beta(\theta) = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e(\theta) - n_o) l \quad (10.4)$$

y χ es igual a:

$$\chi(\theta) = \sqrt{\alpha^2 + \left(\frac{\beta(\theta)}{2} \right)^2} \quad (10.5)$$

Sin voltaje aplicado, y para ciertos tipos de celdas, se puede emplear la aproximación adiabática (Moreno 1996):

$$M = R(\alpha) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{j\beta} \end{pmatrix} \quad (10.6)$$

La matriz de la derecha introduce un desfase entre las componentes ortogonales de la luz en direcciones x e y , mientras la izquierda produce una rotación de ángulo α sobre ellas.

Las pantallas se suelen diseñar con ángulos de giro cercanos a 90° .

Si el voltaje aplicado es muy grande, la celda se comporta como un material isótropo y (10.3) se convierte en la matriz identidad.

10.2.1 Transmisión de la celda de cristal líquido

El modelo descrito permite conocer la transmisión de la celda cuando se sitúa entre dos polarizadores, en función de los parámetros de la celda. Este estudio se empleará para calibrar las celdas de cristal líquido: a partir de medidas experimentales de la transmisión se pueden obtener los parámetros fundamentales (la birrefringencia, el ángulo del director en la primera superficie y el ángulo de rotación del eje director) (Soutar y Lu 1994).

Se considera que el eje de transmisión del primer polarizador forma un ángulo ψ_1 con la dirección del eje x , y el eje de transmisión del polarizador de salida forma un ángulo ψ_2 (se toma el mismo criterio de signos que en el artículo de Soutar y Lu). El director de la primera superficie del cristal está alineado en la dirección del eje y . La transmitancia resulta:

$$T = \left[\cos \chi \cos(\psi_1 - \psi_2 + \alpha) + \frac{\alpha}{\chi} \sin \chi \sin(\psi_1 - \psi_2 + \alpha) \right]^2 + \left[\frac{\beta}{\chi} \sin \chi \cos(\psi_1 + \psi_2 - 2\psi_D - \alpha) \right]^2 \quad (10.7)$$

10.2.2 Configuración de modulación de amplitud y de fase

En las referencias de Moreno (1996) o Lu y Saleh (1990) se puede encontrar la variación de la transmitancia con el voltaje para varias configuraciones de los polarizadores. También se estudia el comportamiento de la fase. Existen dos configuraciones principales. En la configuración de modulación de amplitud, el eje del primer polarizador está perpendicular al director de la superficie de entrada de la celda; con el analizador cruzado, la fase es idéntica para voltaje nulo y para voltaje máximo. En la configuración de modulación de fase la luz incide en la celda paralela al director. El analizador se cruza y se consigue un desfase máximo entre la situación de voltaje nulo y voltaje máximo, pero es evidente que existe una modulación de amplitud asociada. Este hecho representa un inconveniente para emular una pantalla de fase no absorbente como la atmósfera. Una opción es utilizar un rango de voltajes en que la intensidad transmitida apenas varíe pero el voltaje sí lo haga. Otra alternativa es generar estados de polarización cuya intensidad no varíe (Davis et al. 1998, Moreno et al. 1998).

10.3 Parámetros fundamentales de la celda

En el experimento se utilizarán las celdas de cristal líquido modelo *LCX012BLA* extraídas de un videoprojector *SONY VPL-V500QM*. Consta de 640x480 elementos (*pixeles*), cada uno de 31.5x31.5 μm y separados entre sí 42 μm (distancia entre centros). Para caracterizarlas se necesita hallar la orientación del eje director en la primera superficie ψ_D , y el ángulo que gira α . Resulta también de gran interés la variación de la birrefringencia con la longitud de onda. En siguientes apartados se completa esta caracterización, describiendo su respuesta ante un voltaje aplicado.

La técnica más simple para hallar el eje director y su giro, se basa en la ecuación (10.6). Consiste en colocar la celda, sin voltaje aplicado, entre dos polarizadores y girar ambos. La luz a la salida del sistema se extingue cuando el eje del primer polarizador está paralelo o perpendicular al director de entrada de la celda ψ_D y el eje del analizador está

perpendicular al director de salida $\psi_D + \alpha$. Sin embargo la ecuación (10.7) no predice que la intensidad se anule en estas condiciones, salvo en los casos especiales en que se deriva (10.6). Por tanto, esta técnica no es fiable para caracterizar una celda (Soutar y Lu 1994), sobre todo si no conocemos de antemano una estimación de los parámetros para saber si la ecuación (10.6) es aplicable en el caso de voltaje nulo.

Existen otras técnicas para estimar los parámetros (Soutar y Lu 1994, Neto et al. 1996, Coy et al. 1996, Giust y Goedgebuer 1998). Se escoge la de Soutar y Lu con algunas modificaciones para eliminar posibles ambigüedades al determinar los parámetros (Davis 1999a,b,c). Se obtendrá además información sobre la dependencia de la birrefringencia con la longitud de onda. De nuevo, se sitúa la celda sin voltaje aplicado entre dos polarizadores, con lo que la ecuación (10.7) describe la transmisión de luz a través del sistema (el primer polarizador se ilumina con luz circularmente polarizada). Si los polarizadores están cruzados (10.7) queda:

$$T_{\perp} = F_N \left[\cos \chi \sin(\alpha) + \frac{\alpha}{\chi} \sin \chi \cos(\alpha) \right]^2 + \left[\frac{\beta}{\chi} \sin \chi \sin(2\psi_1 - 2\psi_D - \alpha) \right]^2 \quad (10.8)$$

donde F_N es un factor de normalización. Si están paralelos resulta:

$$T_{\parallel} = F_N \left[\cos \chi \cos(\alpha) + \frac{\alpha}{\chi} \sin \chi \sin(\alpha) \right]^2 + \left[\frac{\beta}{\chi} \sin \chi \cos(2\psi_1 - 2\psi_D - \alpha) \right]^2 \quad (10.9)$$

La técnica consiste en girar los polarizadores solidariamente en ambas situaciones e ir midiendo la transmitancia del sistema. Los parámetros de la celda, ψ_D , α y la birrefringencia, se obtienen ajustando las curvas experimentales a las curvas teóricas (10.8) y (10.9). Es necesario realizar la medida para cuatro longitudes de onda (Davis 1999a) para garantizar la unicidad de la solución. La birrefringencia y el factor de normalización dependen de la longitud de onda, mientras ψ_D y α no. En las figuras 10.5 a 10.7 se observan las gráficas experimentales para cada una de las tres celdas (que denominamos roja, azul y verde según el color de la luz que la atravesaba en el videoprojector). Se utilizan cuatro longitudes de onda, tres que corresponden a un láser

de Argón (458 nm, 488 nm y 514 nm) y una correspondiente a un láser de Helio-Neón (633 nm). Los parámetros que se obtienen del ajuste son:

		Celda roja	Celda verde	Celda azul
α		$\pm 91.6^\circ$	$\pm 90.4^\circ$	$\pm 90.5^\circ$
ψ_D		$47.2^\circ \pm 90^\circ$	$47.2^\circ \pm 90^\circ$	$47.2^\circ \pm 90^\circ$
β	458 nm	227°	226°	221°
	488 nm	207°	203°	201°
	514 nm	190°	188°	185°
	633 nm	146°	145°	142°

En las figuras citadas se comparan además las curvas experimentales con las ajustadas de la forma (10.8) y (10.9). Las curvas teóricas reproducen con gran exactitud los datos medidos. La solución es única salvo porque que no se determina el signo de α y porque existe una indeterminación de $\pi/2$ rad en el ángulo ψ_D .

Para obtener el signo de α se mide la curva de transmisión del sistema girando el polarizador y dejando fijo el analizador. Sólo es necesario realizar la medida para una longitud de onda. La transmisión que predice el modelo es (suponiendo $\psi_1=0$):

$$T = \left[\cos \chi \cos(-\psi_2 + \alpha) + \frac{\alpha}{\chi} \sin \chi \sin(-\psi_2 + \alpha) \right]^2 + \left[\frac{\beta}{\chi} \sin \chi \cos(\psi_2 - 2\psi_D - \alpha) \right]^2 \quad (10.10)$$

En la figura 10.8 se muestra la curva experimental (se ha escogido $\lambda=488$ nm) correspondiente a cada celda y el ajuste con los dos valores posibles de α . Es obvio cual es el valor correcto del signo.

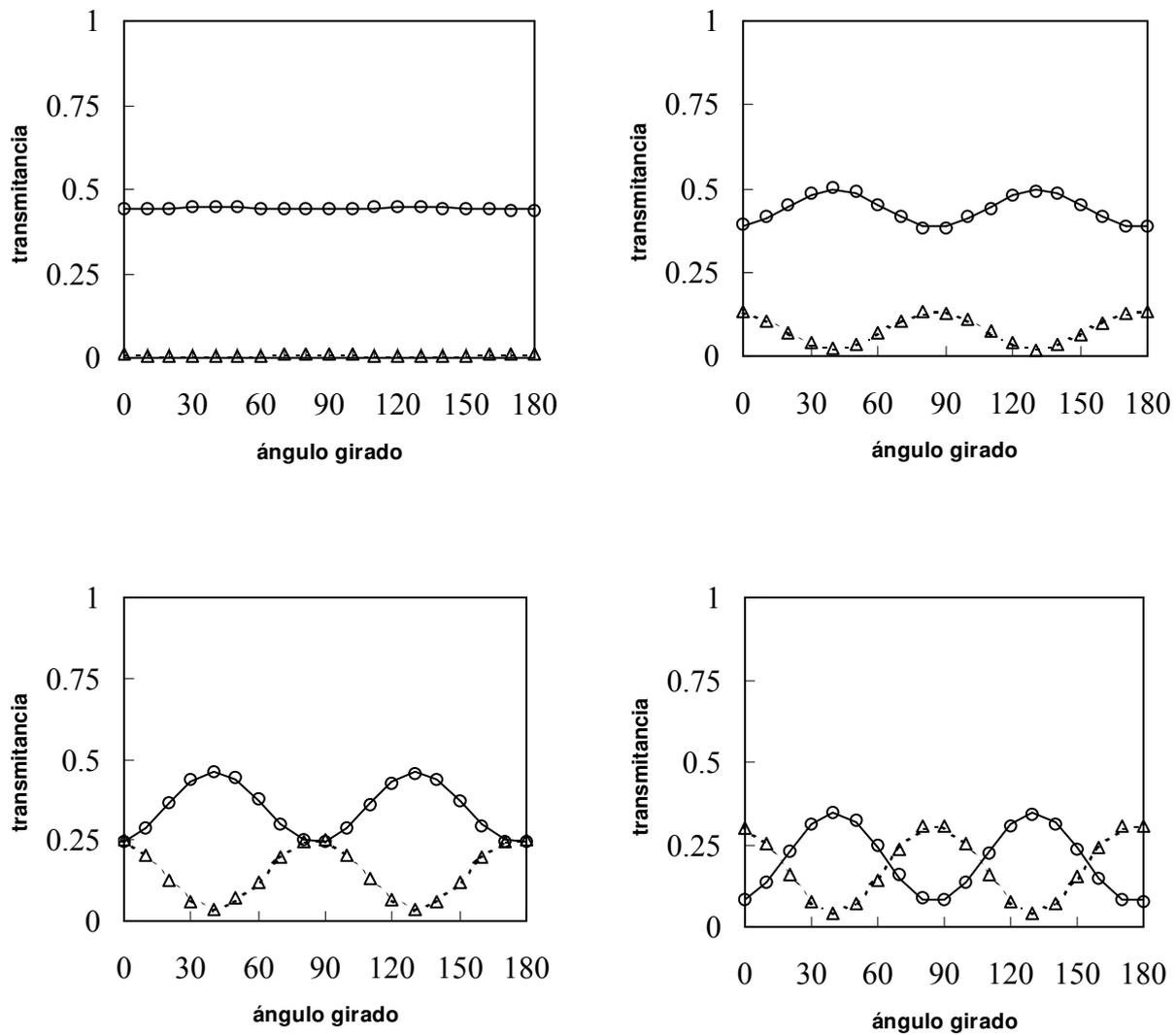


Figura 10.5 Transmitancia de la celda roja en función del ángulo girado por los polarizadores. Polarizadores cruzados: curva teórica (línea continua), datos experimentales (puntos); polarizadores paralelos: curva teórica (línea discontinua), datos experimentales (triángulos). Se utilizan cuatro longitudes de onda: 633 nm (superior izquierda), 514 nm (superior derecha), 488 nm (inferior izquierda) y 458 nm (inferior derecha).

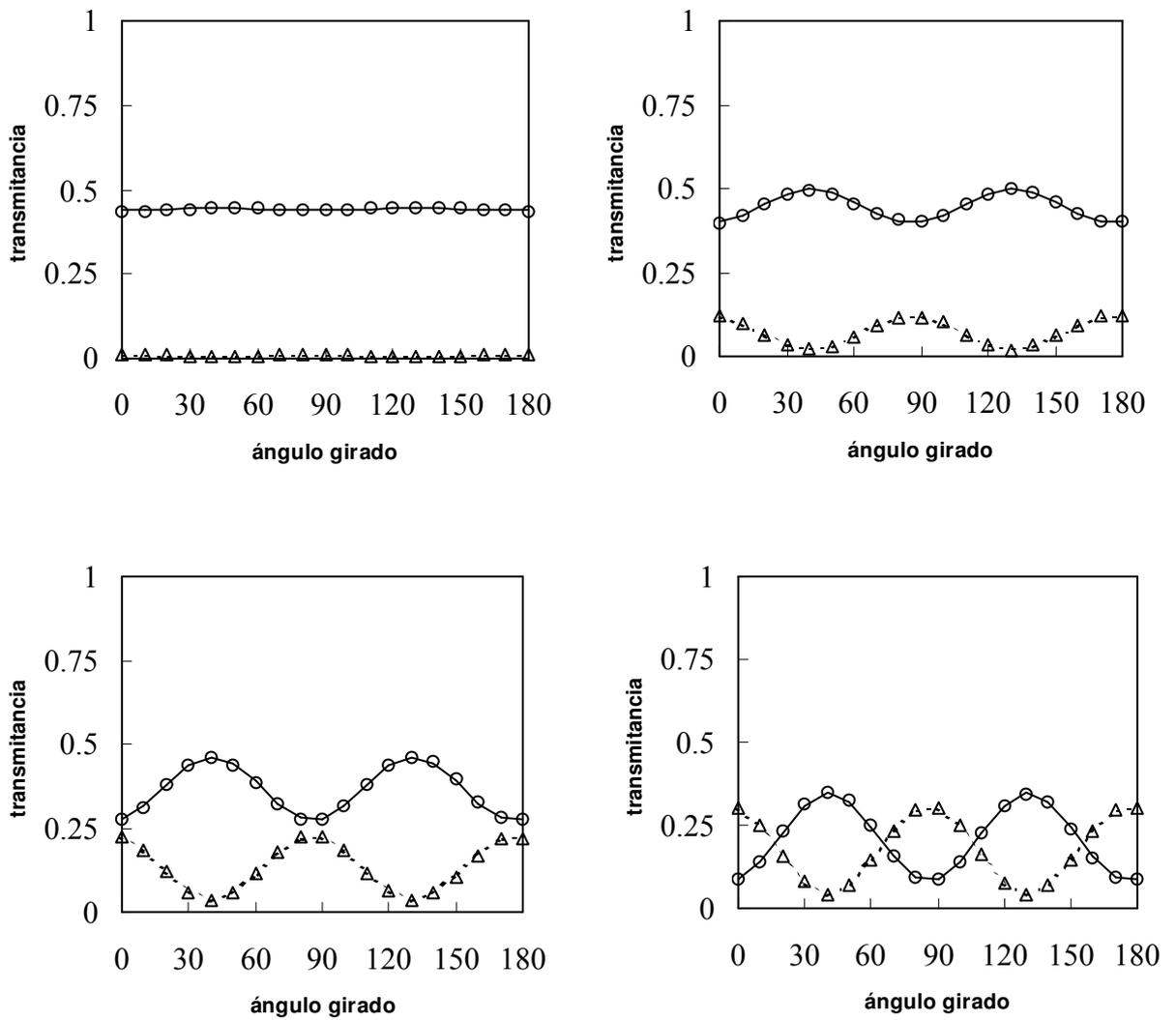


Figura 10.6 Transmitancia de la celda verde en función del ángulo girado por los polarizadores. Polarizadores cruzados: curva teórica (línea continua), datos experimentales (puntos); polarizadores paralelos: curva teórica (línea discontinua), datos experimentales (triángulos). Se utilizan cuatro longitudes de onda: 633 nm (superior izquierda), 514 nm (superior derecha), 488 nm (inferior izquierda) y 488 nm (inferior derecha).

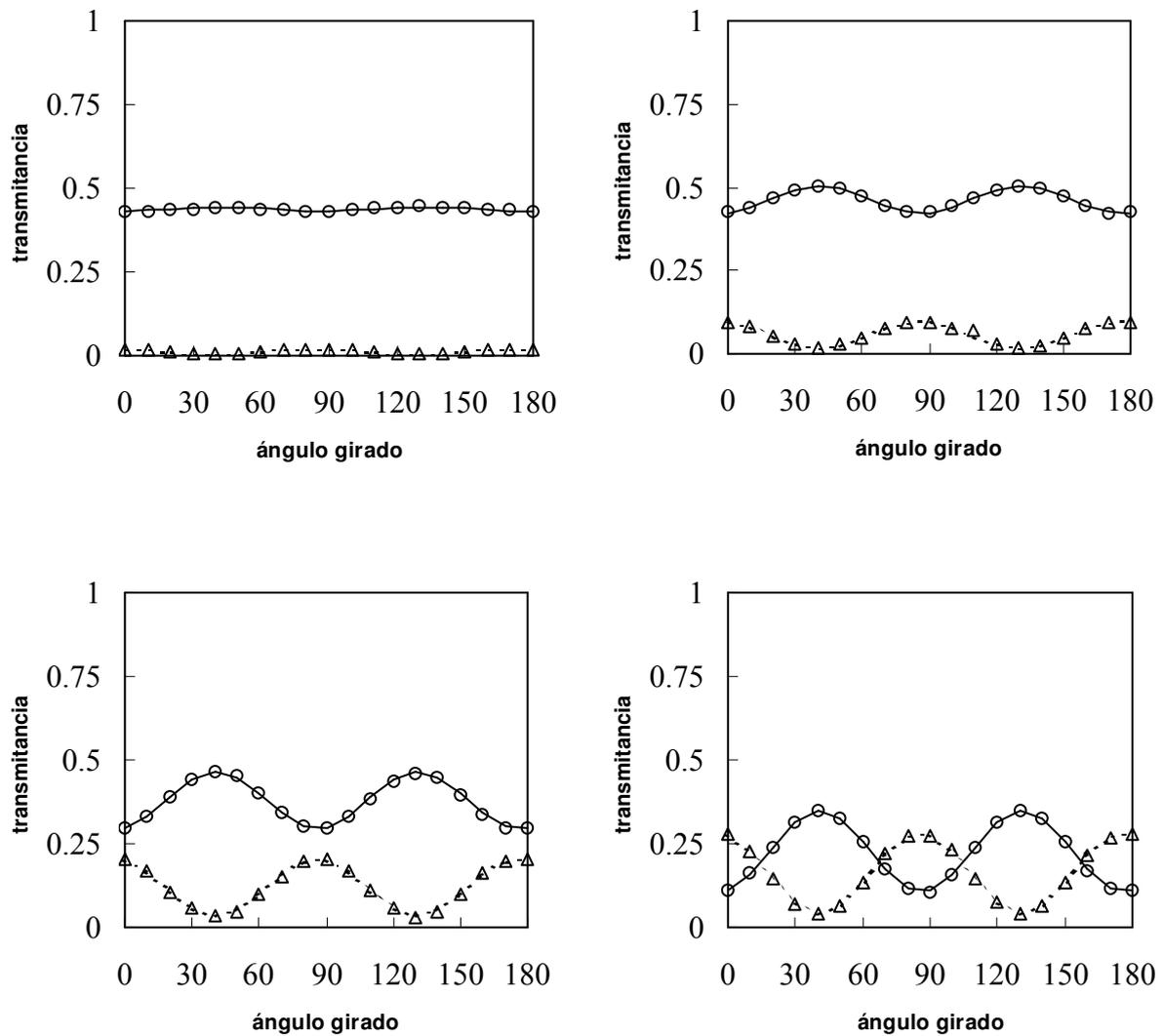


Figura 10.7 Transmitancia de la celda azul en función del ángulo girado por los polarizadores. Polarizadores cruzados: curva teórica (línea continua), datos experimentales (puntos); polarizadores paralelos: curva teórica (línea discontinua), datos experimentales (triángulos). Se utilizan cuatro longitudes de onda: 633 nm (superior izquierda), 514 nm (superior derecha), 488 nm (inferior izquierda) y 488 nm (inferior derecha).

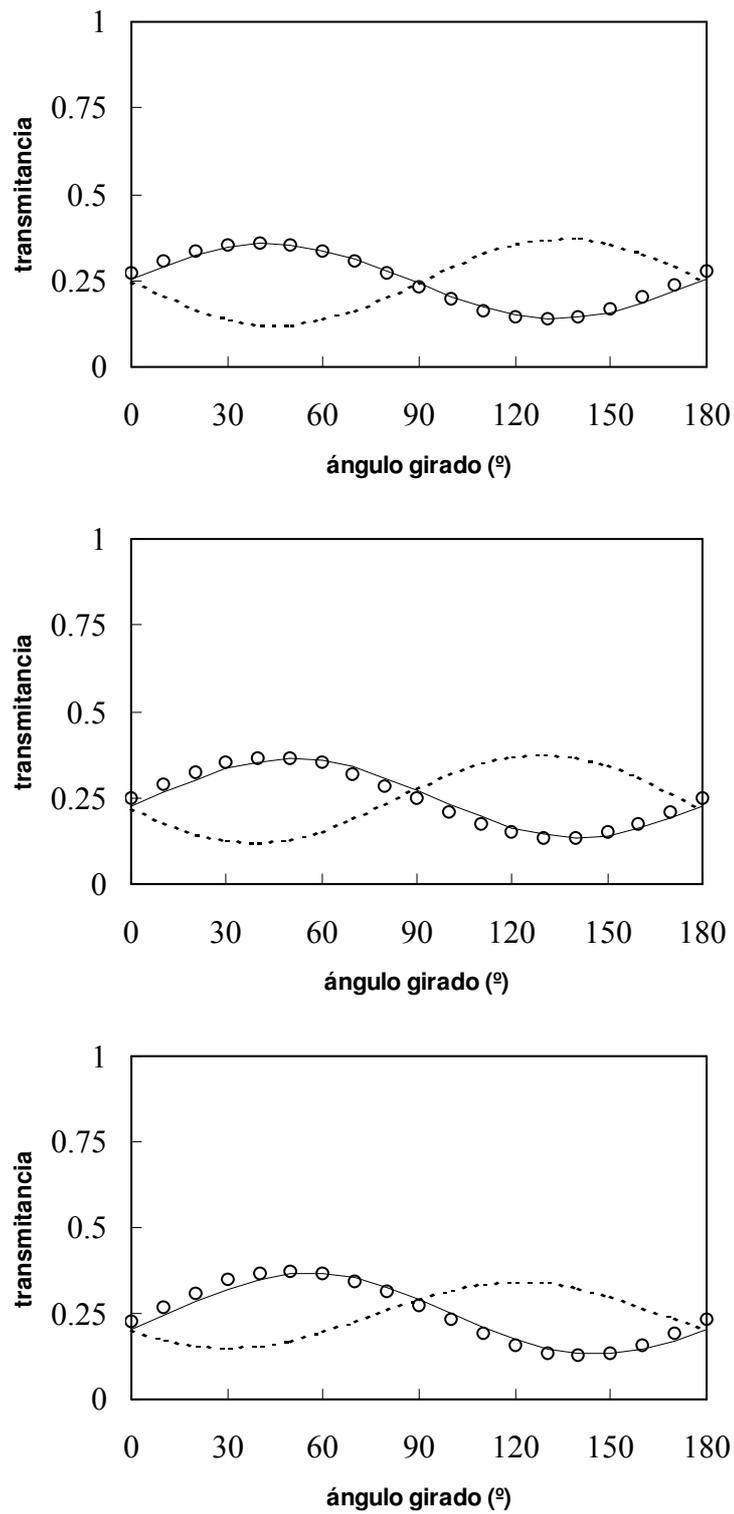


Figura 10.8 Transmitancia en función del ángulo girado por el polarizador con el analizador fijo: datos experimentales (puntos), curva teórica con α positivo (línea discontinua) y curva teórica con α negativo (línea continua). Se muestran la celda roja (gráfica superior), verde (intermedia) y azul (inferior).

Para resolver la indeterminación en ψ_D es necesario conectar la celda al modulador. Se ilumina la celda con luz linealmente polarizada y se observa la figura de difracción producida por la estructura periódica de los *pixeles* de la celda para distintos valores del voltaje aplicado (el voltaje aplicado equivale al nivel de rojo, azul o verde -según la celda- en el videoprojector; en este trabajo se identifican en muchos casos voltaje y nivel de gris). Si la luz entra paralela al eje extraordinario la intensidad de los distintos órdenes de difracción varía al cambiar el voltaje y la figura es asimétrica en ciertos valores; si la luz entra según el eje ordinario, la intensidad no varía (Davis 1999b). En la figura 10.9 se muestra la figura de difracción para dos niveles de gris en el caso de $\psi_D = 47.2^\circ$. En la figura 10.10 se muestran las mismas figuras con la polarización perpendicular a la anterior $\psi_D = 47.2^\circ + 90^\circ = 137.2^\circ$. Se concluye que la luz incide paralela al eje extraordinario en el primer caso. Por tanto, los parámetros que caracterizan las celdas que se utilizarán en el experimento son¹:

		Celda roja	Celda verde	Celda azul
α		- 91.6°	- 90.4°	- 90.5°
ψ_D		47.2°	47.2°	47.2°
β	458 nm	227°	226°	221°
	488 nm	207°	203°	201°
	514 nm	190°	188°	185°
	633 nm	146°	145°	142°

El desfase máximo que se puede obtener disminuye con la longitud de onda. Para compensar este hecho y tener para el color rojo un rango de desfase suficiente, las celdas *rojas* de los videoprojectores suelen fabricarse de mayor espesor que las *azules* o *verdes*, con lo que aumenta el camino óptico y por tanto el desfase máximo. Esta es la razón de que para una misma longitud de onda la celda roja, la de mayor espesor, ofrece el máximo desfase.

¹ Estas medidas se realizaron durante una estancia en la Universidad Autónoma de Barcelona. Los valores se asemejan a los obtenidos en la UAB y en la Universidad de San Diego para celdas similares.

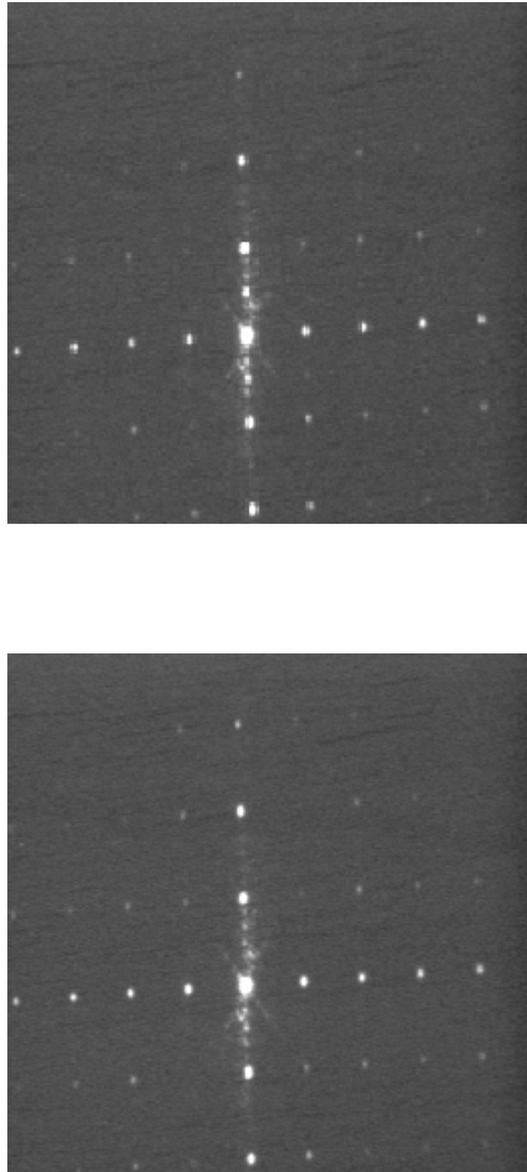


Figura 10.9 Patrón de difracción producido por la estructura periódica de los *pixeles* de la celda en el caso de $\psi_D = 47.2^\circ$. El cuadro superior corresponde al máximo voltaje aplicado o nivel de gris 0 (el voltaje aplicado equivale a nivel de rojo, azul o verde -según la celda- en el videoprojector; de forma genérica se habla de nivel de gris). El cuadro inferior corresponde al nivel de gris 104. Esta imagen es poco clara, pero a simple vista se podía observar con facilidad que la intensidad de algunos órdenes de difracción varía al cambiar el voltaje y que la figura es asimétrica en ciertos valores; por tanto la luz incide paralela al director en esta configuración.

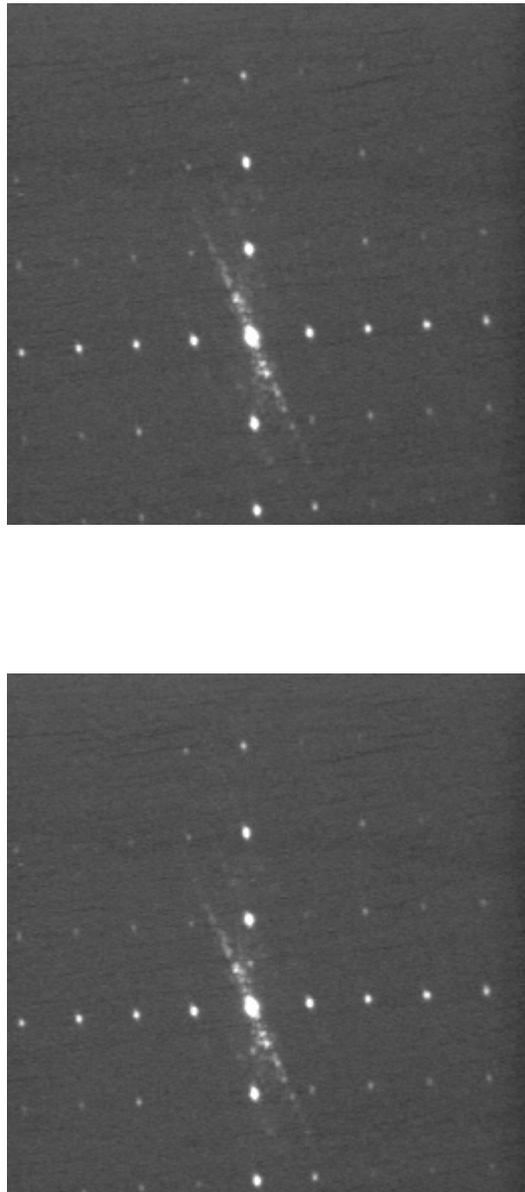


Figura 10.10 Patrón de difracción producido por la estructura periódica de los *pixeles* de la celda en el caso de $\psi_D = 137.2^\circ$. El cuadro superior corresponde al máximo voltaje aplicado o nivel de gris 0. El cuadro inferior corresponde al nivel de gris 104. La intensidad de los distintos órdenes de difracción apenas varía al cambiar el voltaje; por tanto la luz incide perpendicular al director en esta configuración.

10.4 Intensidad transmitida en función del voltaje

El siguiente paso para calibrar las pantallas de cristal líquido es determinar su transmitancia en función del nivel de gris que se introduce. Con este fin se realiza un montaje como el que muestra la figura 10.11. La celda de cristal líquido se sitúa entre dos polarizadores. El eje del primero de los polarizadores coincide con el eje director de la primera superficie de la celda (configuración de fase). El eje del segundo se orienta perpendicular al primero, para obtener el mayor rango de desfases (Moreno 1996). Se varía el nivel de gris, o voltaje en la celda, y se mide la intensidad transmitida a través de los tres elementos. Esta medida se realiza para diversas configuraciones del brillo y contraste en el videoprojector (el brillo es un voltaje constante que se aplica a todos los *pixeles*, mientras que el contraste representa la diferencia entre el voltaje máximo aplicado y el mínimo).

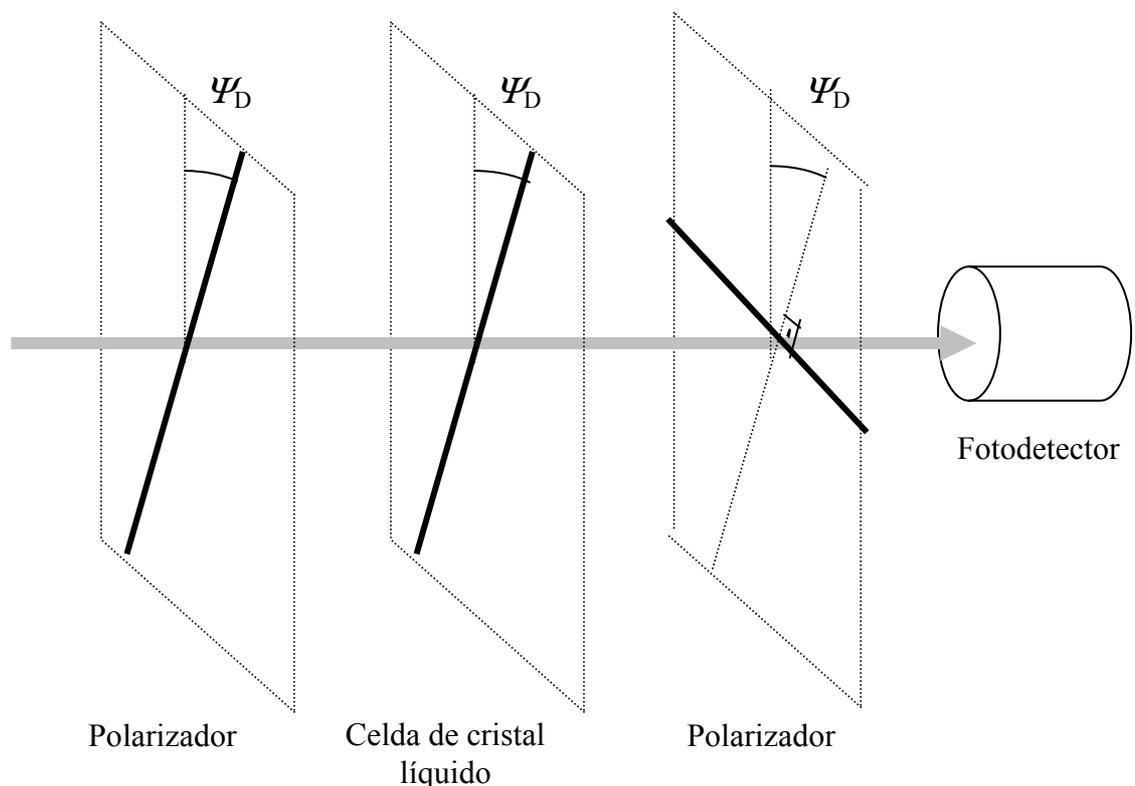


Figura 10.11 Esquema del montaje experimental en que se mide la variación de la intensidad en función del voltaje aplicado a la celda.

La fuente de luz es un diodo láser de estado sólido, de $\lambda=532$ nm. El sistema de detección consiste en un detector *Newport 818 SL* con un potenciómetro *Newport 1815C*. Se ha calibrado previamente este sistema. Para ello se ha enviado luz a través de una serie de filtros neutros de transmitancia conocida, y se ha medido en el potenciómetro la respuesta del detector. La figura 10.12 muestra que la respuesta es lineal para al menos seis órdenes de magnitud de la transmitancia.

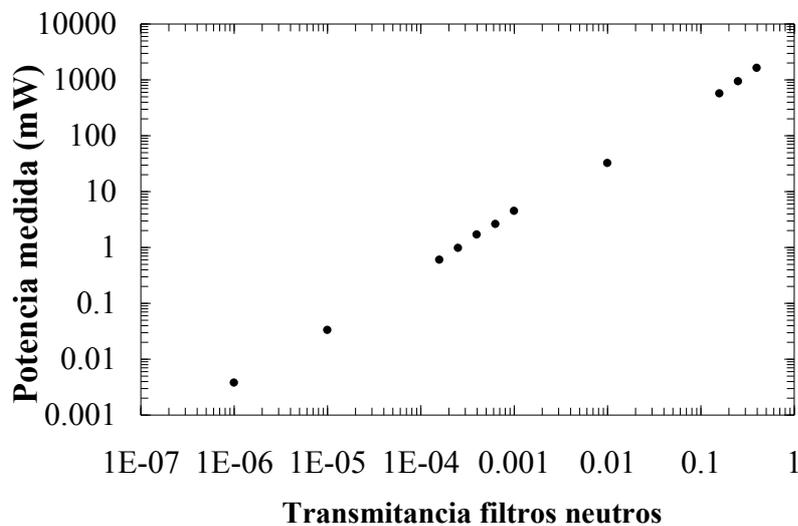


Figura 10.12 Calibración del sistema de detección.

La figura 10.13 muestra la transmitancia en función del nivel de gris en la celda, para diversas configuraciones del brillo y contraste en el videoprojector². Se observa que apenas hay modulación de intensidad si el contraste es cero. Para el contraste intermedio la intensidad varía de forma aproximadamente lineal con el nivel de gris, en la mayor parte del rango. Si el contraste es máximo, la transmitancia varía de forma lineal cuando el nivel de gris es bajo, pero satura rápidamente.

² Se supone que la luz incidente en el primer polarizador ya estaba polarizada en dirección paralela al eje del polarizador.

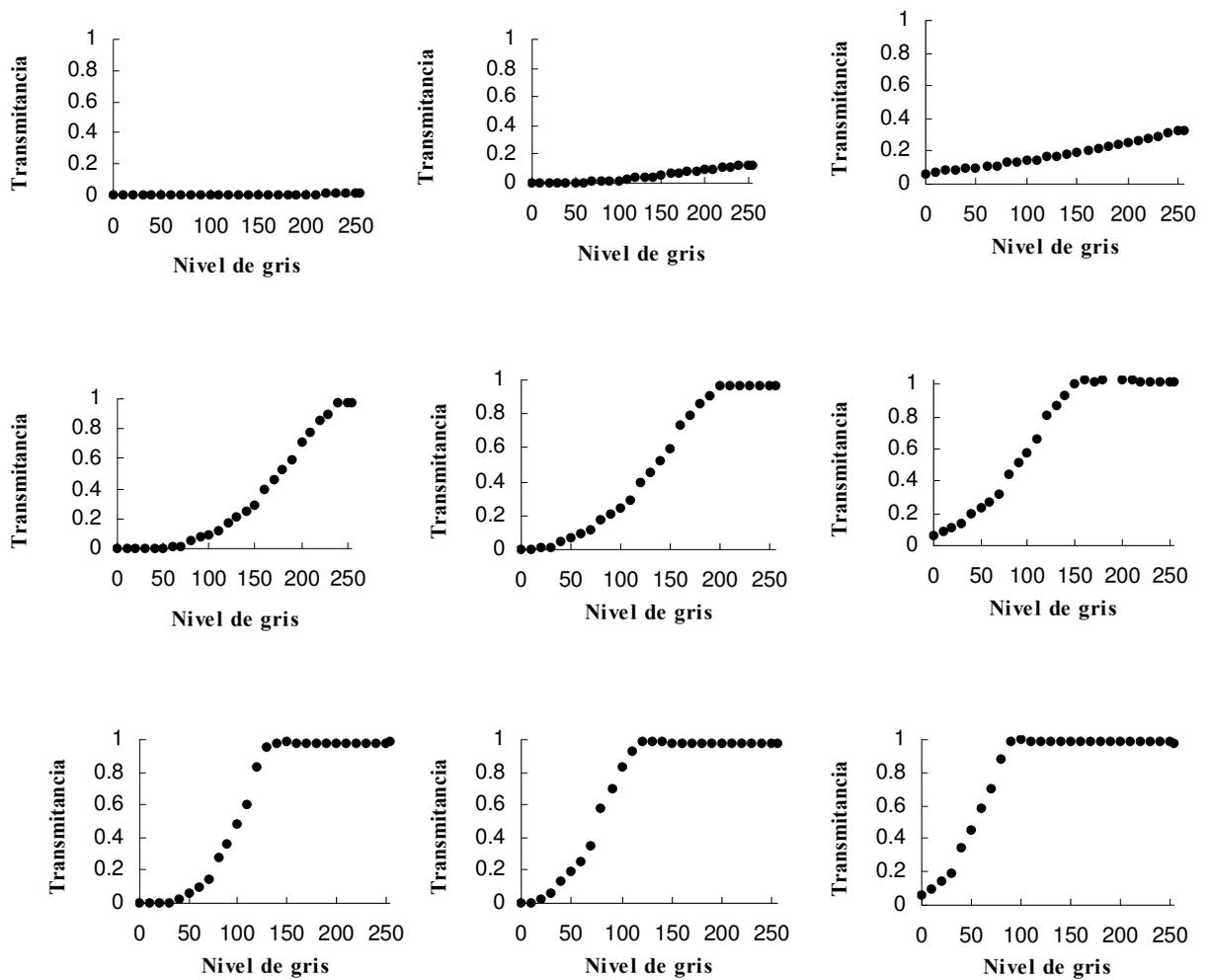


Figura 10.13 Transmitancia en función del nivel de gris en la celda, para diversas configuraciones del brillo y contraste en el videoprojector (y polarizadores cruzados). El contraste es nulo (mínimo posible en la escala del videoprojector) en todas las gráficas de la primera fila, 50 (mitad de la escala) en las de la segunda y 100 (máximo de la escala) en las de la última fila. El brillo es nulo en todas las gráficas de la primera columna, 50 (mitad de escala) en las de la columna central y máximo en las de la columna derecha.

La figura 10.14 muestra la misma magnitud con polarizadores paralelos. Los resultados son complementarios a los anteriores, debido a que el segundo polarizador se ha girado 90° respecto a su posición anterior.

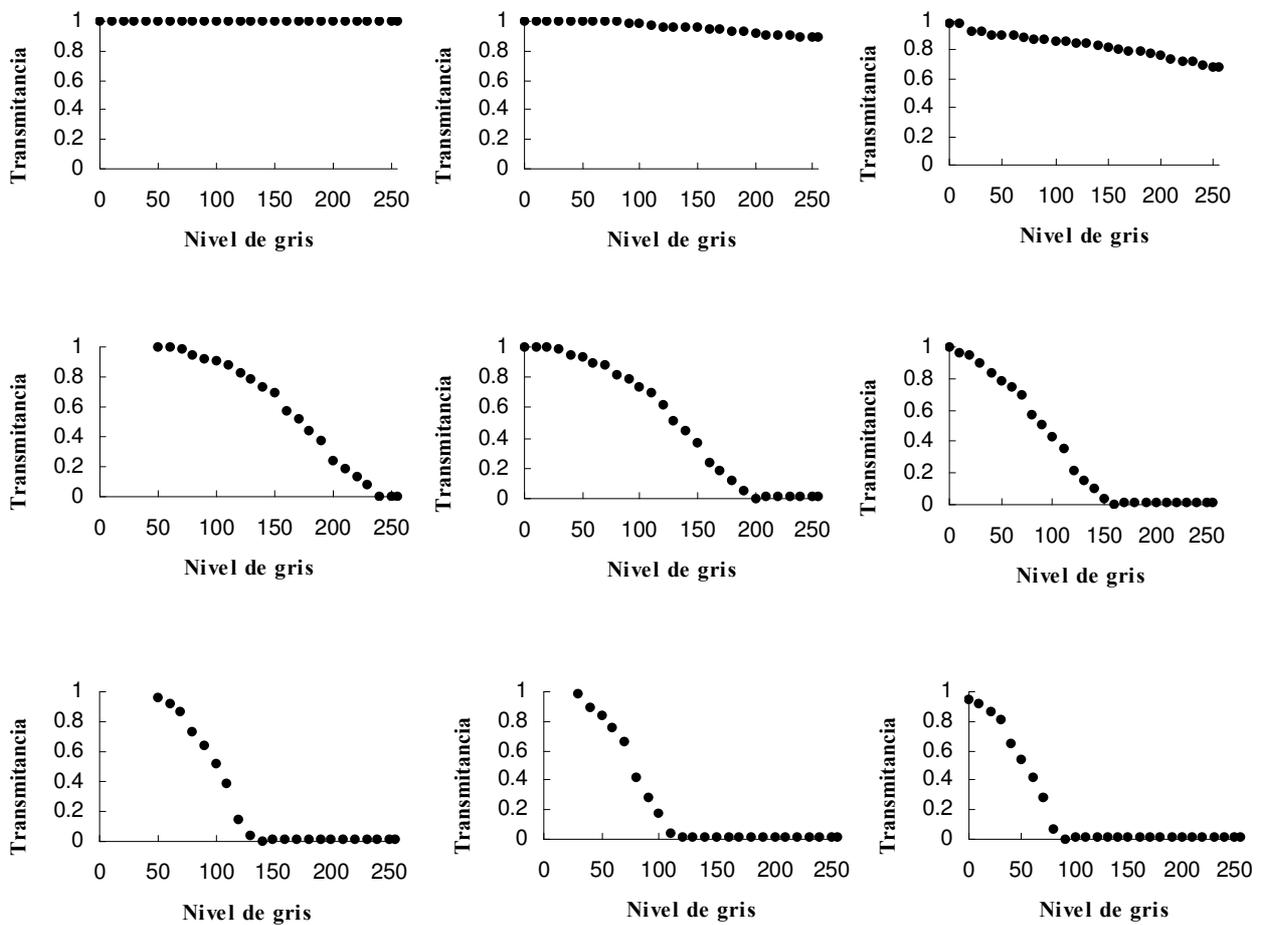


Figura 10.14 Transmitancia en función del nivel de gris con polarizadores paralelos. El contraste es nulo (mínimo posible en la escala del videoprojector) en todas las gráficas de la primera fila, 50 (mitad de la escala) en las de la segunda y 100 (máximo de la escala) en las de la última fila. El brillo es nulo en todas las gráficas de la primera columna, 50 (mitad de escala) en las de la columna central y máximo en las de la columna derecha. Los resultados son complementarios a los anteriores.

10.5 Desfase en función del voltaje

El último paso para calibrar el sistema consiste en medir el desfase que introduce en función del voltaje (o nivel de gris) aplicado, en diversas configuraciones. La información sobre la modulación en intensidad y en fase, sirve para escoger la configuración del sistema (es decir, brillo y contraste en el videoprojector, rango de niveles de gris y posición de los polarizadores) más adecuada para cada aplicación. En el caso de la simulación de la distorsión de un frente de onda por la atmósfera y su posterior corrección por un sistema de óptica adaptativa, se requiere una configuración en la que exista la menor modulación de intensidad posible y una máxima modulación de fase que cubra el intervalo $(-\pi, \pi)$. Configuraciones similares se han obtenido en ciertos dispositivos (Moreno 1996).

El dispositivo experimental para medir la modulación de la fase consiste en un esquema como el mostrado en la figura 10.15. Se utiliza la misma fuente de luz que en el apartado anterior. El haz se divide en dos. El primero de los haces atraviesa una zona de la pantalla de cristal líquido cuyo nivel de gris se mantiene constante, y el segundo una zona de nivel variable. Ambos haces convergen en un punto, y la figura de interferencias se detecta con una cámara CCD *Elbex EX 380*. Los datos se procesan en un *PC* en el que se halla instalada una tarjeta digitalizadora *Data Translation DT 2861*. Al variar el nivel de gris en la segunda zona, la figura de interferencias se desplaza. Midiendo este desplazamiento se conoce la modulación de fase.

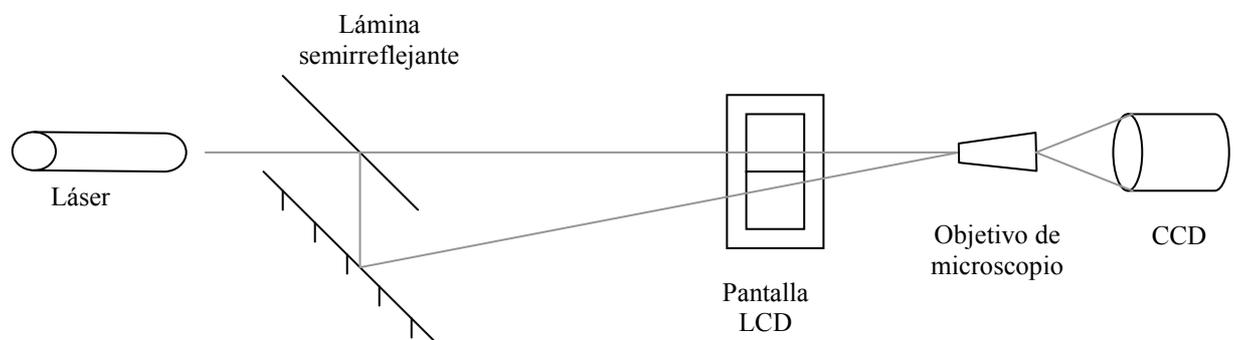


Figura 10.15 Dispositivo experimental para medir la modulación de fase en función del nivel de gris en la pantalla de cristal líquido.

Los resultados obtenidos en algunas configuraciones se muestran en la figura 10.16. Se muestra la modulación de fase en función del nivel de gris en la segunda de las zonas de la pantalla. Comparando con las gráficas anteriores, se observa que si la modulación de intensidad es pequeña al variar el nivel de gris, también lo es la modulación de fase. En las configuraciones en que existe un rango de niveles de gris con importante modulación de fase también existe modulación de intensidad apreciable. Esto significa que el dispositivo utilizado no presenta zonas en que module sólo la fase pero no la intensidad de la onda, como se deseaba. Las pantallas de proyectores más antiguos podrían ser más adecuadas porque ofrecen mayores valores de birrefringencia y es posible lograr modulación “casi” sólo de fase (a cambio de una menor velocidad de respuesta).

En el sistema de que se dispone se ha escogido la configuración de brillo nulo y contraste intermedio (50), porque la modulación de fase es considerable y lineal en el rango de niveles de gris entre 101 y 250. La intensidad también varía de forma lineal. En el siguiente capítulo se desarrollará el experimento en el que las pantallas de cristal líquido introducen el efecto de la atmósfera y del sistema de óptica adaptativa. En el experimento se ha de tener en cuenta la limitación impuesta por la modulación de intensidad asociada a la modulación de fase.

10.6 Conclusiones

Se han enumerado las razones para utilizar una pantalla de cristal líquido proveniente de un videoprojector para introducir los efectos de la atmósfera y del sistema de corrección en el frente de onda. Uno de los inconvenientes de estos dispositivos es que es necesario caracterizarlos. Por tanto, se han obtenido los parámetros fundamentales de la pantalla *SONY* que se empleará en el experimento y se ha determinado su modulación de intensidad y de fase. Se ha demostrado que no existe ninguna configuración en que exista importante modulación sólo de fase. Por consiguiente, se ha escogido una configuración con modulación de fase lineal, pero en la que se ha de tener en cuenta la modulación de

intensidad asociada y la limitación del rango de desfases que es capaz de producir la celda.

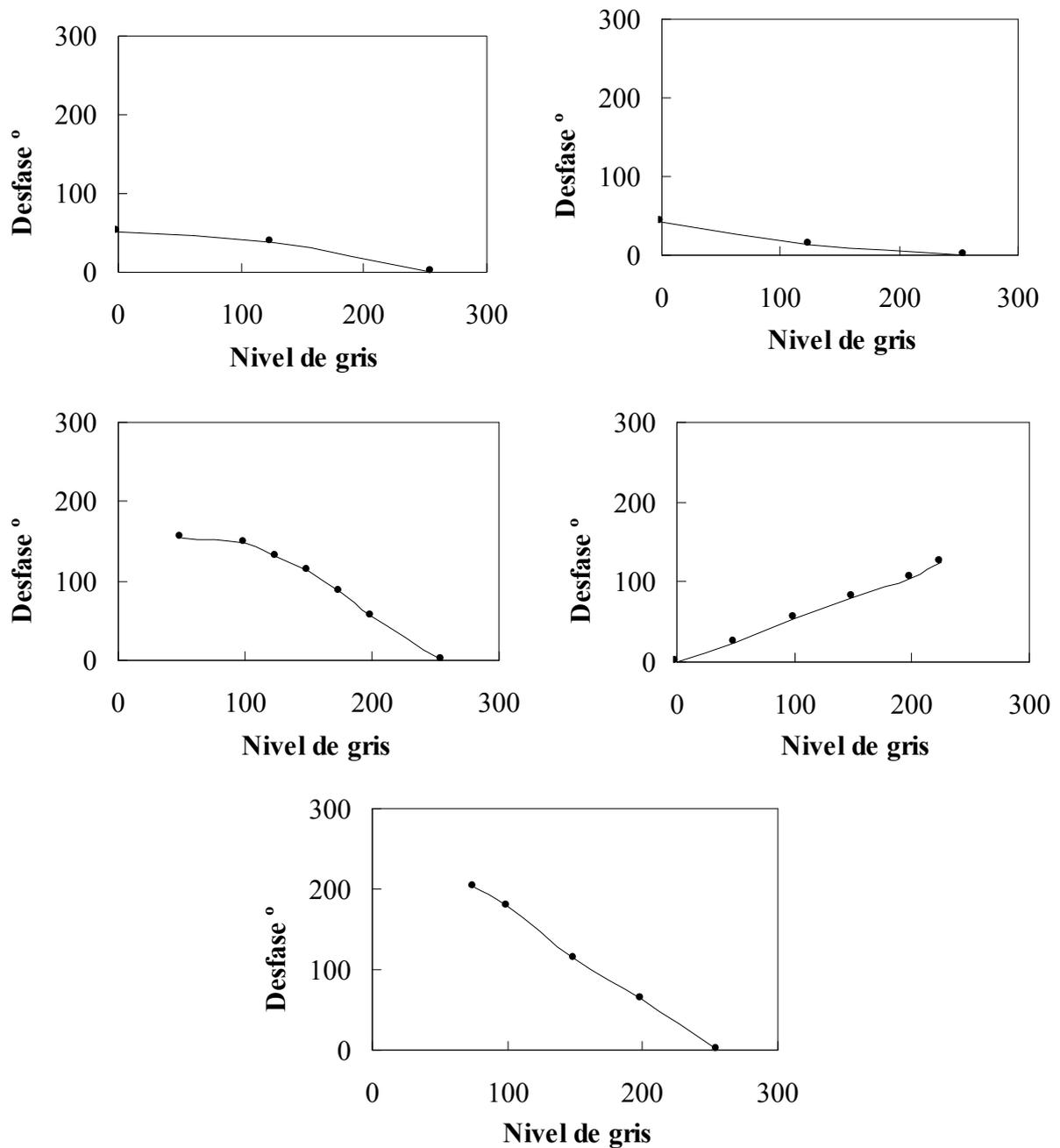


Figura 10.16 Modulación de fase en función del nivel de gris en la segunda de las zonas de la pantalla, para diversas configuraciones del sistema. Las configuraciones se describen por su brillo (B), contraste (C), orientación de los polarizadores -paralelos (PP) o cruzados (PC)- y nivel de gris constante en la primera zona (N). De izquierda a derecha y en orden descendente se muestran las gráficas correspondientes a las configuraciones: B máximo, C nulo, PP, N 255 // B intermedio, C nulo, PP, N 255 // B intermedio, C intermedio, PC, N 255 // B nulo, C intermedio, PP, N 0 // B nulo, C intermedio, PC, N 255.