

Polarization experiment at home. Malus's law and photoelasticity

Experimento de polarización en casa. Ley de Malus y fotoelasticidad

Yobani Mejía-Barbosa*

Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Física, Bogotá-Colombia

(*)E-mail: ymejiab@unal.edu.co

S: miembro de SEDOPTICA / SEDOPTICA member

Received: 24/10/2021

Accepted: 14/12/2021

DOI: 10.7149/OPA.55.1.51072

ABSTRACT:

A polarization experiment is presented to verify Malus's law and explain the phenomenon of photoelasticity. The experiment is carried out with an experimental setup at home, which includes to build up some holders for two polarizing acetate sheets, a white light led flashlight, a mobile phone photographic camera, and an acrylic rule. With the photographic camera, a sequence of images is recorded without the rule to verify Malus's law and another sequence of images with the rule to see the color fringes of the photoelasticity phenomenon. The images are analyzed in their R-G-B color components and the formation of the color fringes is explained as an additive mixture of the primary colors and as an interference process.

Key words: Polarization, Malus's law, Photoelasticity.

RESUMEN:

Se presenta un experimento de polarización para verificar la ley de Malus y explicar el fenómeno de fotoelasticidad. El experimento se realiza con un montaje experimental en casa, que incluye la fabricación de soportes en cartón, una linterna de un led de luz blanca, la cámara fotográfica de un teléfono móvil, una escuadra en acrílico y un par de láminas de acetato polarizadoras lineales. Con la cámara fotográfica se registra una secuencia de imágenes sin la escuadra para verificar la ley de Malus y otra secuencia de imágenes con la escuadra para observar las franjas de color propias del fenómeno de fotoelasticidad. Las imágenes se analizan en sus componentes de color R-G-B y se explica la formación de las franjas de color como una mezcla aditiva de los colores primarios y como un proceso de interferencia.

Palabras clave: Polarización, Ley de Malus, Fotoelasticidad.

REFERENCES AND LINKS / REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] E. Hecht, Optics. Pearson Education India, (2002).
- [2] M. Born, E. Wolf, Principles of optics: Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light. Cambridge, Cambridge University Press (1999).
- [3] G. R. Fowles, Introduction to Modern Optics. Dover Publications, Inc., (1989).

1. Introducción

En el último año algunos de los cursos experimentales de la carrera de Física en la Universidad Nacional de Colombia se han dado de manera virtual. En particular, el curso Mediciones en Óptica y Acústica, ofrecido para estudiantes que cursan el tercer año de carrera. En este curso los estudiantes realizan experimentos en óptica geométrica, polarización, interferencia y difracción, empleando la infraestructura usual para este tipo de cursos, por ejemplo: lentes, espejos, fuentes de luz (láser, lámparas de descarga, focos incandescentes), divisores de haz, polarizadores, pantallas opacas con aberturas, rejillas de difracción, cámaras de video, sensores de intensidad, láminas retardadoras de fase, etc. Además, resulta conveniente disponer de mesas tipo panel, soportes y carros de desplazamiento milimétrico o micrométrico.

Usualmente, en el curso se realizan 10 prácticas simultáneas abarcando los temas mencionados anteriormente. Los estudiantes se organizan en grupos de dos o tres miembros, completando 10 grupos. En cada sesión (4 horas/semana) cada grupo realiza una de las 10 prácticas, es decir, se tiene una rotación de los grupos para cada práctica. Se ha establecido este procedimiento debido a la limitación en el número de equipos que se pueden armar para cada práctica.

En la virtualidad no se establecen grupos de manera presencial, de modo que cada estudiante debe realizar en casa la parte experimental que se pueda hacer. Ya que no se cuenta en el laboratorio con el número suficiente de equipos para enviar a la casa de cada estudiante, se propuso experimentos que requieren poco equipo y de fácil adquisición en una tienda de artículos escolares y de oficina. En particular se propuso un experimento para estudiar el fenómeno de fotoelasticidad [1] con un montaje óptico realizado por los mismos estudiantes, empleando elementos de papelería. En los informes de laboratorio los estudiantes presentan un análisis cualitativo de las gráficas polares de intensidad para los colores R-G-B y su explicación sobre las franjas de color. En este artículo, se describe el experimento de fotoelasticidad realizado por los estudiantes en sus casas y se muestra un análisis de la formación de las franjas de color: primero, como un proceso de filtrado por polarización; y segundo, como un proceso de interferencia.

2. Análisis teórico

Consideremos una onda electromagnética de longitud de onda λ y frecuencia angular ω propagándose en la dirección z . El campo eléctrico se puede representar como

$$E(x, y, z; t) = \{E_{ox}e^{i\delta_x}, E_{oy}e^{i\delta_y}\}e^{(i2\pi z/\lambda - \omega t)} \quad (1)$$

El estado de polarización de la onda está determinado por las amplitudes complejas de las componentes. La evolución de la punta del vector eléctrico proyectado en el plano $z = 0$ resulta ser [2]

$$\frac{E_x^2}{|E_{ox}|^2} - 2\frac{E_x}{|E_{ox}|}\frac{E_y}{|E_{oy}|}\cos(\Delta\delta) + \frac{E_y^2}{|E_{oy}|^2} = \sin^2(\Delta\delta) \quad (2)$$

donde $\Delta\delta = \delta_y - \delta_x$ es la diferencia de fase de las dos componentes del vector eléctrico. Si

- $\Delta\delta = m\pi$, con m entero, el estado de polarización es lineal.
- $\Delta\delta = (2m - 1)\pi/2$, con m entero, el estado de polarización es elíptico o circular. Los ejes de la elipse están en las direcciones horizontal (E_x) y vertical (E_y).
- $\Delta\delta$ tiene otro valor, el estado de polarización es una elipse rotada. El ángulo de rotación ψ del eje mayor está dado por

$$\tan 2\psi = \tan 2\alpha \cos \Delta\delta \quad (3)$$

donde $\tan \alpha = |E_{oy}|/|E_{ox}|$.

2.1. Filtrado por polarización

En la Fig. 1(a) se muestra la forma general de la elipse de polarización, dada por la Eq. (2), rotada un ángulo ψ . Si una onda con este estado de polarización elíptico, incide en un polarizador lineal con su eje de transmisión en un ángulo θ , la amplitud E_θ de la onda transmitida polarizada linealmente estará determinada por la proyección de la elipse como se muestra en la Fig. 1(b). Dibujando el módulo de la amplitud de la onda transmitida en función del ángulo θ se obtiene la trayectoria en forma de ocho mostrada en la Fig. 1(c).

La trayectoria del módulo de la amplitud depende de la excentricidad de la elipse, como se muestra en la Fig. 2. En (a), la excentricidad igual a 1 implica que el estado de polarización es lineal en lugar de elíptico. La trayectoria es un ocho cerrado en su punto medio, lo que también ocurre para la intensidad. En (b), la excentricidad es igual a 0.90 y ahora la trayectoria tiene la forma de un ocho que no se cierra en su punto medio. En (c), la excentricidad es igual a 0.66 y la trayectoria se aleja de la forma del ocho acercándose a la elipse que describe el estado de polarización. En el caso de la polarización circular la trayectoria coincide con el círculo.

Para calcular el valor de la proyección E_θ consideremos la Fig. 3. Luz no polarizada de longitud de onda λ incide en el polarizador lineal PL1 con su eje de transmisión rotado un ángulo α . La onda transmitida tendrá un estado de polarización lineal y luego incide en una lámina retardadora de fase de espesor d , de donde emerge, en general, una onda con un estado de polarización elíptico. Suponiendo que la lámina retardadora de fase en la dirección x tiene el índice de refracción n_x y en la dirección y el índice de refracción n_y , el retraso de fase entre las

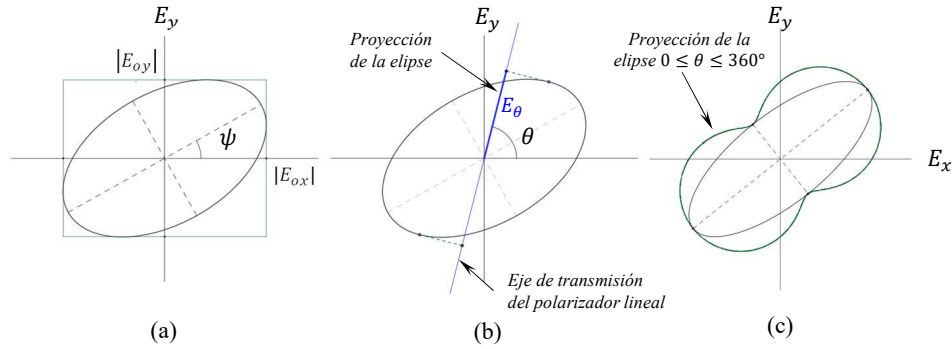


Fig. 1. (a) Elipse de polarización rotada un ángulo ψ . (b) Transmisión de la onda con polarización elíptica en un polarizador lineal con su eje de transmisión formando un ángulo θ . (c) Trayectoria del módulo de la amplitud de la onda transmitida en función del ángulo θ .

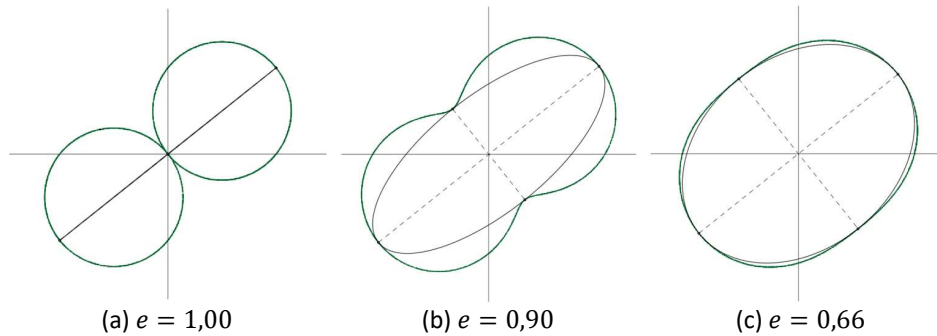


Fig. 2. Trayectoria de la proyección de la elipse de polarización en un polarizador lineal para diferentes excentricidades. En (a) la excentricidad $e = 1$ implica que en lugar de polarización elíptica se tiene polarización lineal.

dos componentes del campo eléctrico en x y y estará dado por

$$\Delta\delta = \frac{2\pi d}{\lambda}(n_y - n_x) \quad (4)$$

Finalmente, esta última onda incide en el polarizador lineal PL2 con su eje de transmisión rotado un ángulo θ y nuevamente se tendrá un estado de polarización lineal.

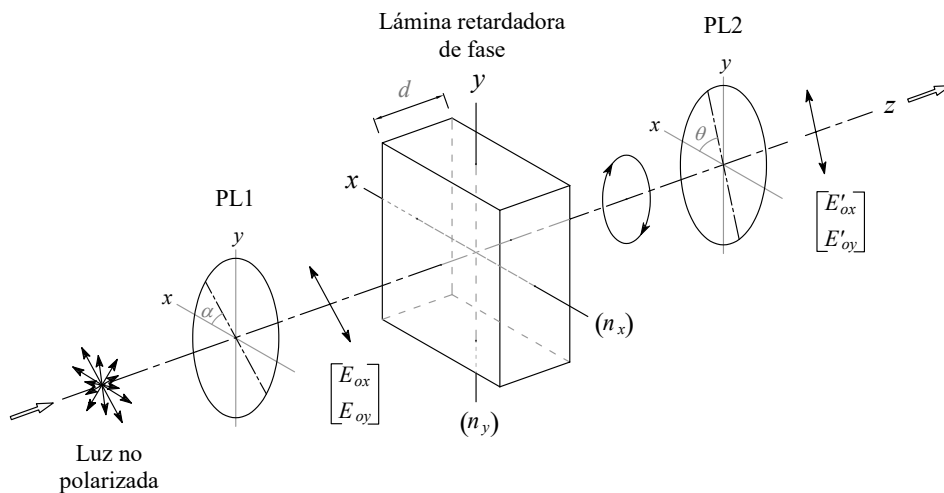


Fig. 3. Cambio del estado de polarización en el sistema conformado por dos polarizadores lineales PL1 y PL2 y una lámina retardadora de fase.

Supongamos que el estado de polarización después del primer polarizador lineal está dado por el vector de

Jones [3]

$$\begin{bmatrix} E_{ox} \\ E_{oy} \end{bmatrix} . \quad (5)$$

El estado de polarización lineal después de pasar por la lámina retardadora de fase y el segundo polarizador lineal estará dado por

$$\mathbf{E}_\theta = \begin{bmatrix} E'_{ox} \\ E'_{oy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin(2\theta)/2 \\ \sin(2\theta)/2 & \sin^2 \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\delta_x} & 0 \\ 0 & e^{i\delta_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{ox} \\ E_{oy} \end{bmatrix} . \quad (6)$$

En el lado derecho de la ecuación, la primera matriz representa el segundo polarizador lineal con su eje de transmisión inclinado el ángulo θ y la segunda matriz representa la lámina retardadora de fase. Resolviendo el producto matricial se llega a

$$\begin{bmatrix} E'_{ox} \\ E'_{oy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{ox} e^{i\delta_x} \cos^2 \theta + E_{oy} e^{i\delta_y} \sin(2\theta)/2 \\ E_{ox} e^{i\delta_x} \sin(2\theta)/2 + E_{oy} e^{i\delta_y} \sin^2 \theta \end{bmatrix} . \quad (7)$$

La intensidad transmitida por el segundo polarizador será entonces

$$I_\theta = \mathbf{E}_\theta \cdot \mathbf{E}_\theta^* = \{E'_{ox}, E'_{oy}\} \cdot \{E'_{ox}, E'_{oy}\}^* , \quad (8)$$

es decir

$$I_\theta = E_{ox}^2 (\cos^4 \theta + \sin^2(2\theta)/4) + E_{oy}^2 (\sin^4 \theta + \sin^2(2\theta)/4) + E_{ox} E_{oy} \sin(2\theta) \cos(\Delta\delta) , \quad (9)$$

lo que se reduce a

$$I_\theta = E_{ox}^2 \cos^2 \theta + E_{oy}^2 \sin^2 \theta + E_{ox} E_{oy} \sin(2\theta) \cos(\Delta\delta) , \quad (10)$$

Finalmente,

$$E_\theta = \sqrt{I_\theta} . \quad (11)$$

La Eq. (11) es la descripción teórica de las curvas mostradas en la Fig. 2. En particular, si el estado de polarización después del primer polarizador está dado por $\{E_{ox}, 0\}$ y el desfase $\Delta\delta = 0$, la Eq. (10) se reduce a la expresión usual para la ley de Malus [1]

$$I_\theta = I_o \cos^2 \theta , \quad (12)$$

donde $I_o = E_{ox}^2$.

2.2. Interferencia por polarización

Si definimos $I_x = E_{ox}^2 \cos^2 \theta$ y $I_y = E_{oy}^2 \sin^2 \theta$, la Eq. 10 se puede reescribir como

$$I_\theta = I_x + I_y + 2\sqrt{I_x I_y} \cos(\Delta\delta) , \quad (13)$$

que es la expresión usual de la interferencia de dos haces. Lo anterior significa que el sistema óptico formado por dos polarizadores lineales y una lámina anisotrópica en medio es un tipo de interferómetro. Este interferómetro no es de división de frente de onda ni de división de amplitud. El primer polarizador define las amplitudes de las componentes del campo que inciden en la lámina anisotrópica, la lámina introduce un desfase $\Delta\delta$ entre las componentes, en el segundo polarizador las dos componentes desfasadas se proyectan a lo largo del eje transmisión y se recombinan. Si la diferencia de camino óptico $\Lambda = d(n_y - n_x)$, correspondiente al desfase $\Delta\delta$ (Eq. 4), es menor que la longitud de coherencia se tendrá interferencia.

Cuando el sistema óptico de la Fig. 4 se ilumina con luz blanca, cada color experimentará el proceso de interferencia dado por la Eq. (13) con diferente valor de desfase $\Delta\delta$. Esto modifica el peso relativo de la intensidad por color, dando lugar a las franjas de color cuando se superponen en intensidad todos los colores.

3. Preparación del experimento

Teniendo en mente que la parte experimental en ciencias pone en contacto directo a los estudiantes con los fenómenos naturales, los equipos y el proceso de medida, para realizar el experimento de fotoelasticidad se propuso a los estudiantes la fabricación de unos soportes que permitan medir de manera reproducible la intensidad de la luz transmitida en un estado de polarización determinado. En la Fig. 4 se muestra el montaje experimental con los soportes para los polarizadores hechos en casa. El experimento incluye un par de polarizadores lineales, una cámara fotográfica, una fuente de luz blanca (led), una lámina de acrílico (escuadra o regla) y, por supuesto, un pc para el procesamiento de la información.

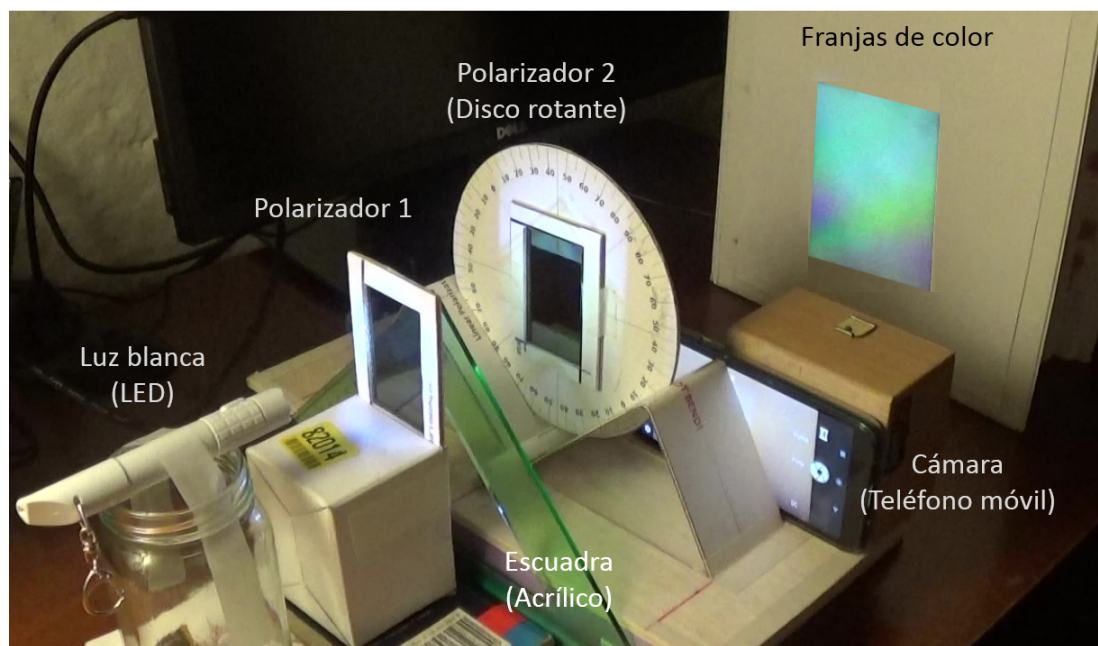


Fig. 4. Experimento casero para medir el estado de polarización en algunos puntos de la lámina de acrílico (escuadra) a partir de las franjas de color.

3.1. Polarizadores lineales

De los elementos que requieren los estudiantes, los polarizadores lineales son los de mayor dificultad para adquirir. No es usual que en las tiendas de artículos escolares y de oficina vendan este tipo de elementos. Así que, en este caso, el profesor suministra (envía por correo) un par de láminas polarizadoras lineales de 7×5 cm (láminas de acetato). Para manipular las láminas polarizadoras se propuso enmarcarlas en lámina de cartón, no muy gruesa (1 mm de espesor), como se muestra en la Fig. 4.

3.2. Soporte de rotación

Para rotar uno de los polarizadores se propuso la fabricación de un disco graduado en su periferia en grados (0 - 360°), con una ventana (rectangular o cuadrada) en el centro para alojar el polarizador lineal 2. El disco se hace descansar en una cuña que tiene un par de ranuras, como se muestra en la Fig. 4. La cuña, a su vez, descansa sobre una base (lámina). Los materiales para la fabricación de cada uno de los elementos son láminas de cartón y para la base se sugiere una lámina de balsa.

3.3. Fuente luminosa

Para la fuente luminosa se sugirió una linterna de un led de luz blanca que sea relativamente estable durante el tiempo de duración de las medidas.

3.4. Objeto anisotrópico

Una escuadra de 45° en acrílico de 2 mm de espesor.

3.5. Pantalla de observación

La luz transmitida después de los dos polarizadores se observa sobre una hoja de papel blanco pegada a un soporte vertical.

3.6. Cámara fotográfica

Para registrar las imágenes en color se sugirió emplear la cámara del teléfono móvil. Se advierte que las imágenes deben estar en un formato de 1 megapixel o menos, para facilitar el procesamiento digital de la misma.

4. Realización del experimento

El experimento se realiza en dos partes: la primera, verificar la ley de Malus; la segunda, observar el fenómeno de fotoelasticidad. En ambos casos se realiza un conjunto de medidas para determinar el estado de polarización en

algunos puntos. En el montaje de la Fig. 4 los ejes de transmisión de los polarizadores están en dirección horizontal. El polarizador 1 se deja fijo. El proceso de medida consiste en rotar cada 10° el polarizador 2 (soporte circular) y grabar la proyección de la luz en la pantalla de observación (zona rectangular iluminada) con la cámara del teléfono móvil.

La imagen en color registrada se procesa digitalmente para obtener una región de interés (cuadrada) de la zona iluminada en la pantalla de observación y para separar la imagen en sus componentes R-G-B. Con esto último se pretende una aproximación del espectro que compone la luz blanca de la linterna. De esta manera nos vamos a referir al estado de polarización de la luz para los colores rojo (R), verde (G) y azul (B). El estado de polarización se mide en seis puntos.

4.1. Ley de Malus

Para la verificación de la ley de Malus se emplea el montaje de la Fig. 4 sin la escuadra. En la Fig. 5(a) se muestra la región iluminada cuando los dos polarizadores tienen sus ejes de transmisión paralelos entre sí. Y en las Figs. 5(b), (c) y (d), se muestran las componentes R-G-B correspondientes a la Fig. 5(a).

A primera vista se tiene que en la Fig. 5(a) la iluminación es aproximadamente homogénea. Esto también ocurre para las componentes R-G-B. Tomando una imagen cada 10° , entre 0° y 360° , se obtiene un conjunto de 36 imágenes. Se define una región de interés cuadrada idéntica para todas las imágenes y se marcan seis puntos con las etiquetas 1, 2, 3, 4, 5 y 6, como en la Fig. 5(a), en las mismas posiciones para todas las imágenes. Luego se encuentran los valores de intensidad R-G-B para cada uno de los seis puntos (en escala de 0 a 1 en 255 niveles) y el resultado se dibuja en forma polar como se muestra en la Fig. 6. El procesamiento de las imágenes se realizó con el software Matlab.

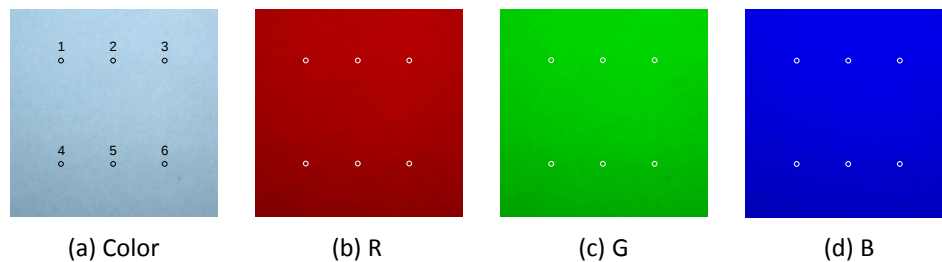


Fig. 5. (a) Iluminación en la región de interés cuando se omite la escuadra entre los polarizadores y el ángulo entre los ejes de transmisión de los polarizadores es 0° . En (b), (c) y (d) se muestran las componentes R, G y B, respectivamente, de la imagen de la Fig. 5(a) digitalizada.

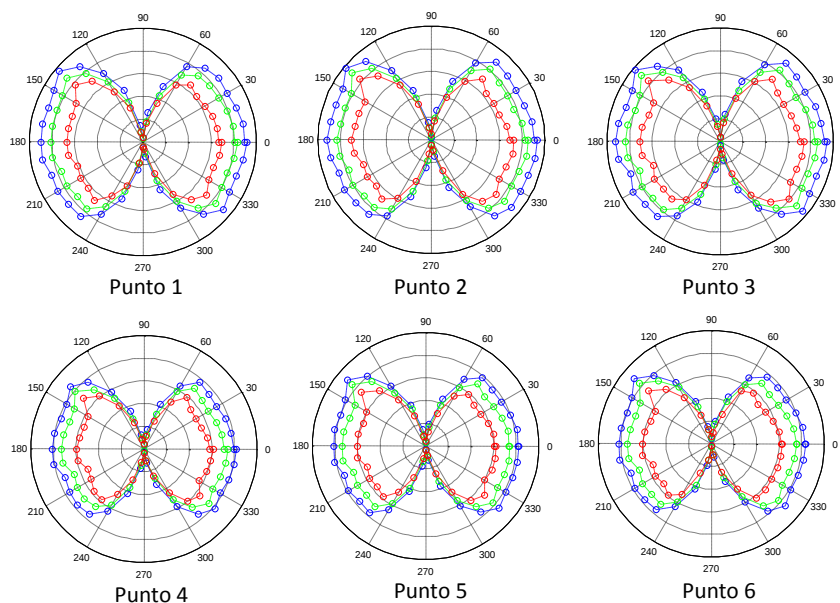


Fig. 6. Gráficas polares de la intensidad transmitida por el polarizador lineal 2 cuando se rota cada 10° entre 0° y 360° para los colores R-G-B en los seis puntos marcados en la Fig. 5(a).

Para los seis puntos, y para cada color, en efecto se verifica la ley de Malus, cuya dependencia $\cos^2 \theta$ en una

gráfica polar tiene la forma del símbolo infinito (o un ocho acostado). En el ángulo 0° los ejes de transmisión de los polarizadores están paralelos entre sí, a lo largo de la dirección horizontal en la Fig. 4. En las seis gráficas polares podemos ver que el color azul tiene mayor peso y el color rojo menor. En particular, para 0° , la mezcla aditiva de los tres colores es un color blanco ligeramente azulado, como se ve en la Fig. 5(a). El color blanco se obtendría cuando el peso de los tres colores es igual 1. Para otros ángulos se tienen valores menores a 1, dando un color gris azulado y en 90° , cuando los ejes de transmisión son ortogonales entre sí, se tiene el color negro (cero intensidad). Entonces, la figura con forma del símbolo infinito nos dice que el estado de polarización de la luz transmitida por el polarizador 1 es lineal.

4.2. Fotoelasticidad

En esta segunda parte, se coloca la escuadra de acrílico en medio de los dos polarizadores como se observa en la Fig. 4 y se repite el proceso de medida realizado para verificar la ley de Malus. Entonces, nuevamente se tienen 36 imágenes de la región iluminada en la pantalla de observación grabadas con la cámara fotográfica. En la Fig. 7 se muestra algunas de las imágenes de intensidad obtenidas cuando el ángulo entre los ejes de transmisión de los polarizadores es 0° , 30° , 60° , 90° , 120° y 150° .

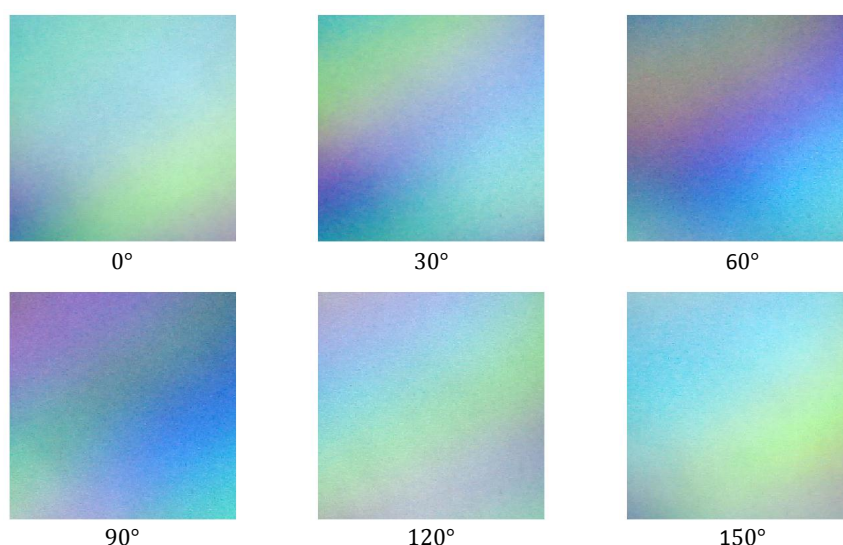


Fig. 7. Franjas de color para diferentes ángulos entre los ejes de transmisión de los polarizadores lineales de la Fig. 4.

Para cada una de las 36 imágenes se realiza la separación de las componentes R-G-B. En la Fig. 8(a) se muestra la imagen con franjas de color para el ángulo de rotación de 60° (Fig. 7). Ahora la distribución del color en cada una de las componentes R-G-B no es homogéneo, como puede verse en las Figs. 8(b), (c) y (d). Por ejemplo, en el punto 6 la componente R tiene poco peso (cercano a cero) en comparación con las componentes G y B (que se acercan a uno), el resultado de la mezcla aditiva es el color cian. Entonces, las franjas de color de la Fig. 8(a) se pueden explicar como la mezcla aditiva de las componentes R-G-B que son modificadas en intensidad cuando la luz atraviesa la escuadra de acrílico. Cada color experimenta un cambio en el estado de polarización lineal inicial (dado por el polarizador 1) al viajar a través de la escuadra debido a la anisotropía en el índice de refracción del acrílico. En general, para un punto dado, el estado de polarización con que emerge cada color de la lámina será elíptico (elipse rotada). Cuando cada color llega al polarizador 2, este proyecta las elipses a lo largo del eje de transmisión, dando como resultado un cambio relativo en la intensidad de las componentes.

Para obtener el estado de polarización de los seis puntos indicados en la Fig. 8(a) primero se obtienen las gráficas polares de la intensidad (Fig. 9) y luego se calculan las gráficas polares para el módulo de la amplitud del campo óptico (raíz cuadrada de la intensidad), como se muestra en la Fig. 10. A primera vista, de la Fig. 9, tenemos que para cada color el estado de polarización cambia de un punto a otro. Por ejemplo, la curva roja en el punto 1 se acerca a un estado de polarización circular mientras que la curva roja en el punto 6 se acerca a una estado de polarización lineal (elipse con excentricidad cercana a 1). Por otro lado, las curvas en azul en los seis puntos tienen diferentes orientaciones, lo que indica que las elipses de polarización están rotadas diferentes ángulos. Todo esto muestra que la lámina de acrílico es inhomogénea y anisotrópica.

Para ver cómo se obtiene el estado de polarización en un punto y para un color, consideremos los datos del punto 6 de la Fig. 10. Los valores máximo (E_{max}) y mínimo (E_{min}) de cada color definen los ejes mayor y menor de la elipse de polarización, así como el ángulo de rotación. En la Tabla 1 se muestran los parámetros para los

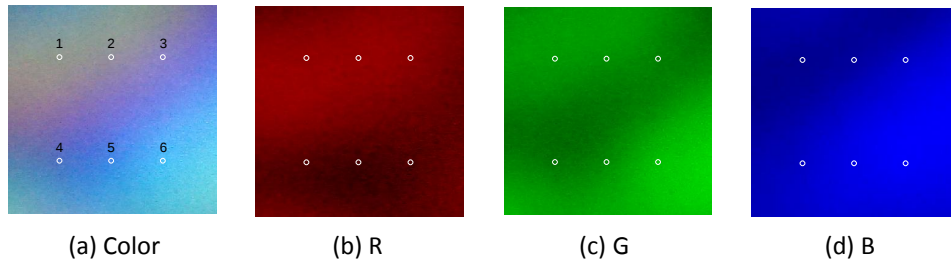


Fig. 8. Franjas de color y sus componentes R-G-B cuando el ángulo del eje de transmisión del polarizador lineal 2 con respecto al eje de transmisión del polarizador lineal 1 es 60° .

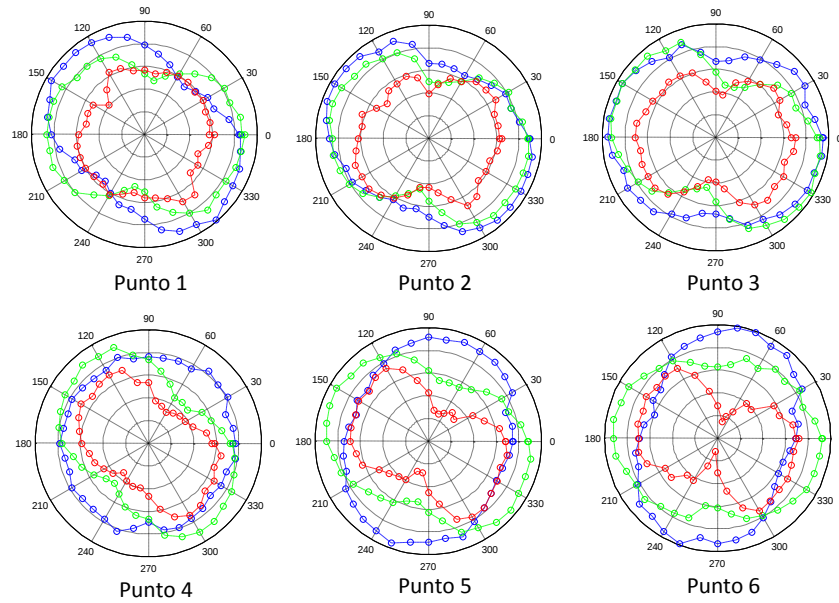


Fig. 9. Gráficas polares de la intensidad transmitida por el polarizador lineal 2 cuando se rota cada 10° entre 0 y 360° para los colores R-G-B en los seis puntos marcados en la Fig. 8(a).

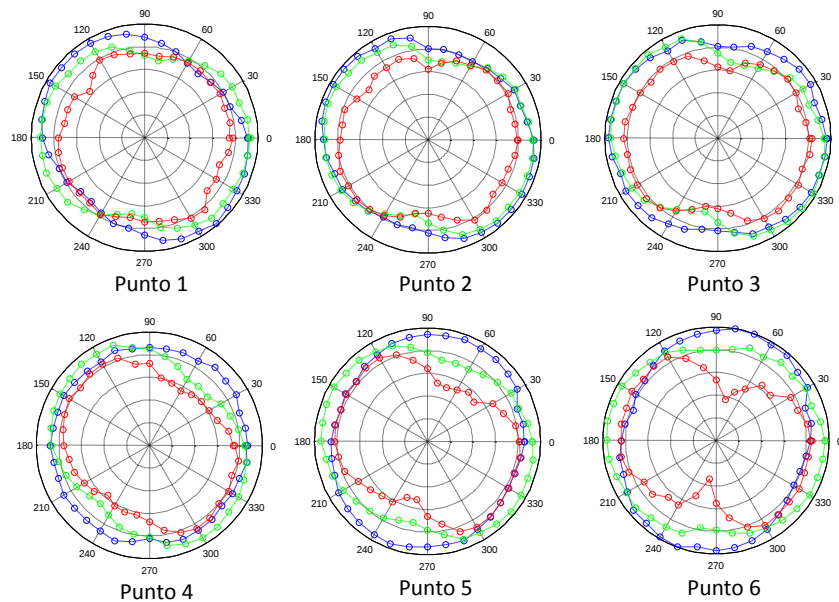


Fig. 10. Gráficas polares del módulo de la amplitud del campo óptico transmitido por el polarizador lineal 2 cuando se rota cada 10° entre 0 y 360° para los colores R-G-B en los seis puntos marcados en la Fig. 8(a).

colores R-G-B. El ángulo de rotación de la elipse se toma igual al ángulo que forma el eje mayor con la horizontal.

La excentricidad se calcula con los valores de amplitud de los semiejes mayor E_{max} y menor E_{min} a partir de $e = \sqrt{E_{max}^2 - E_{min}^2}/E_{max}$.

Tabla 1. Parámetros de las elipses de polarización de la Fig. 11.

Color	R	G	B
E_{max}	0.84	0.96	0.99
E_{min}	0.35	0.80	0.80
e	0.91	0.66	0.73
ψ	-10°	0	70°

A partir de los datos de la Tabla 1 se dibujan las elipses de polarización para cada color, como se muestra en la Fig. 11.

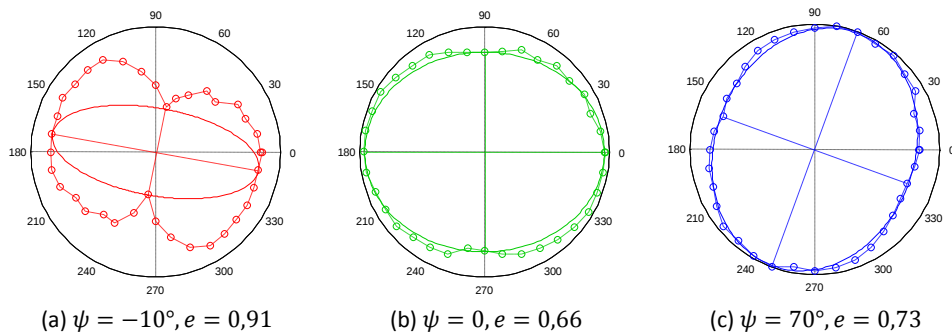


Fig. 11. Elipses de polarización para los colores R-G-B en el punto 6 de la Fig. 10.

Resumiendo, cada color incide en la escuadra de acrílico con un estado de polarización lineal (con su plano de vibración horizontal) y emergen con diferentes estados de polarización elíptico. Estos cambios ocurren por el desfase que experimentan las componentes ortogonales del campo eléctrico dentro del acrílico. Cada componente del campo viaja con una velocidad que depende del valor del índice de refracción correspondiente a la dirección de vibración de la componente. Como los índices son diferentes, se tendrá un retraso temporal entre las componentes al salir de la escuadra, lo que se traduce en un desfase. Por otro lado, el índice de refracción también es función de la longitud de onda, en consecuencia, el desfase varía con el color. El resultado final en punto dado del espacio después de la escuadra es que tendremos diferentes elipses de polarización para los diferentes colores, como se muestra en la Fig. 11.

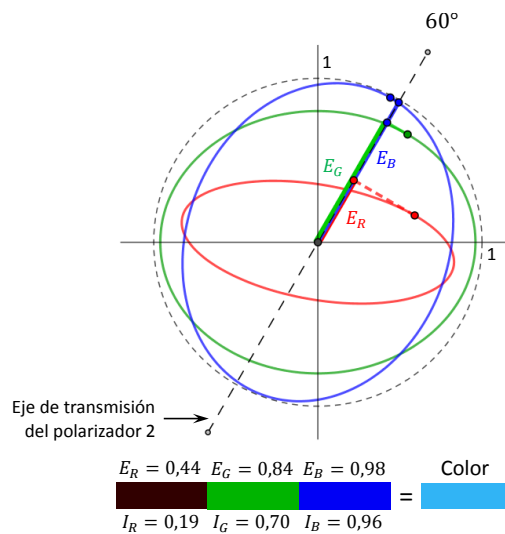


Fig. 12. Cálculo de las amplitudes y las intensidades de los colores R-G-B y su mezcla aditiva en el punto 6 de la Fig. 10 (Fig. 8(a)). La Proyección de las elipses de polarización R-G-B se hace a lo largo del eje de transmisión del polarizador lineal 2 cuando forma un ángulo de 60° .

Finalmente, a partir de las elipses de polarización podemos reconstruir el color en un punto dado de la región

de iluminación en la pantalla de observación (Fig. 4) para una orientación específica del eje de transmisión del polarizador 2. Por ejemplo, tomemos nuevamente las elipses del punto 6 (Fig. 11) y supongamos que el polarizador lineal 2 tiene su eje de transmisión orientado 60° (Fig. 7). Pintando sobre las elipses una línea con inclinación de 60° podemos proyectar cada elipse sobre esa línea para obtener el valor de amplitud en cada caso, como se muestra en la Fig. 12. Estos valores corresponden con los datos experimentales representados con los círculos pequeños a 60° en la Fig. 10. Los valores de intensidad obtenidos elevando al cuadrado los valores de amplitud proyectados son $I_R = 0.44^2 = 0.19$, $I_G = 0.84^2 = 0.70$, $I_B = 0.98^2 = 0.96$. La mezcla aditiva de estos tres colores se muestra en la parte inferior de la Fig. 12 y el resultado corresponde con el color cian, como también se puede ver alrededor del punto 6 de la Fig. 8(a).

5. Conclusiones

Los resultados experimentales mostrados en este artículo permiten establecer que los soportes para los polarizadores fabricados en casa con el cuidado apropiado son adecuados para analizar de forma cuantitativa el fenómeno de fotoelasticidad. También es posible concluir que la escuadra de acrílico localmente tiene un comportamiento óptico similar al de una lámina birrefringente uniaxial.

Tenemos dos caminos para explicar las franjas de color: (a) filtrado por polarización, (b) interferencia por polarización. En ambos casos, la coherencia óptica entre las componentes ortogonales que describen el estado de polarización está implícito. Si la diferencia de camino óptico entre las componentes es menor que la longitud de coherencia no tendremos un estado de polarización definido (la elipse de polarización cambiará aleatoriamente), en otras palabras, no tendremos interferencia entre las componentes. Lo anterior se debe traducir en que el patrón de franjas de color variará con el tiempo. En este experimento se optó por describir la formación de las franjas de color mediante el filtrado por polarización, observando como cambian los estados de polarización en un punto para cada color y como cambian los estados de polarización en diferentes puntos.

La imagen del patrón de franjas de color se registra con una cámara digital de color. Estas cámaras incluyen filtros espectrales en los píxeles para digitalizar la imagen en colores primarios (R-G-B). Así, en la práctica, tenemos que la imagen en color se reconstruye mediante una mezcla aditiva de los colores primarios. Entonces, las curvas R-G-B de las Figs. 6 y 9 no describen los estados de polarización de los colores que realmente componen la luz blanca emitida por el led, sino mas bien algún tipo de promedio. Sin embargo, nos permiten entender el proceso de formación del patrón de franjas de color.