

# Polarización de la Luz

Javier Alejandro Salcedo Castañeda  
Laboratorio III - Departamento de Física – Facultad de Ciencias  
Universidad de Los Andes  
Mérida, Venezuela  
Julio, 2025

## RESUMEN

Este informe detalla experimentos sobre la polarización de la luz. Se confirmó la Ley de Malus, que describe cómo la intensidad de la luz polarizada varía con el ángulo del analizador, mostrando una fuerte concordancia entre los datos experimentales y la teoría. Se investigó la polarización por birrefringencia con un material retardador, observando cómo este modifica el estado de polarización de la luz. Se validó el ángulo de Brewster mediante la polarización por reflexión, obteniendo un valor experimental de  $55,0^\circ$  cercano al teórico de  $56,3^\circ$ , con una discrepancia del 2,31 %. Se cuantificó la disminución de la intensidad de la luz refractada al aumentar el número de placas de un material transparente. Adicionalmente, se realizó una demostración de fotoelasticidad donde se observaron diferentes patrones de colores al aplicar deformación mecánica a un plástico, revelando las líneas de tensión y compresión inducidas. Estos experimentos proporcionaron una comprensión práctica de la naturaleza transversal de las ondas electromagnéticas y la manipulación de la polarización de la luz.

## A. OBJETIVOS

- Confirmar experimentalmente la Ley de Malus.
- Investigar y caracterizar los efectos de un material retardador sobre la luz polarizada.
- Analizar la polarización por reflexión y validar el ángulo de Brewster.
- Cuantificar la variación de la intensidad de la luz refractada en función del número de placas de un material transparente.

## B. MARCO TEÓRICO

Las ondas electromagnéticas se distinguen por su naturaleza transversal; sus campos eléctrico y magnético oscilan perpendicularmente a la dirección de propagación. La orientación del campo eléctrico define el plano de oscilación y, por ende, la dirección de polarización de la onda. La luz proveniente de fuentes convencionales carece de polarización, siendo una superposición desordenada de ondas con diversos planos de oscilación. Cuando estos planos se alinean en una dirección específica, la luz se considera polarizada.

Considerando dos ondas que se propagan en la misma dirección, pero con planos de oscilación perpendiculares entre sí, sus componentes eléctricas pueden expresarse como:

$$E_x = E_{0x} \cos(kz - wt) \quad E_y = E_{0y} \cos(kz - wt + \epsilon) \quad (1)$$

La onda electromagnética resultante se obtiene sumando vectorialmente estas componentes:

$$\vec{E} = \vec{E}_x + \vec{E}_y \quad (2)$$

Al manipular la Ecuación (1) (eliminando la dependencia temporal y realizando simplificaciones trigonométricas), se deriva la siguiente relación que describe la trayectoria del extremo del vector campo eléctrico:

$$\frac{E_x^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y^2}{E_{0y}^2} - \frac{2E_x E_y}{E_{0x} E_{0y}} \cos(\epsilon) = \sin^2(\epsilon) \quad (3)$$

Esta ecuación representa una elipse. Cuando  $\epsilon = (m + \frac{1}{2})\pi$  (donde  $m$  es un entero), se observa una polarización elíptica, y la expresión se simplifica a:

$$\frac{E_x^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y^2}{E_{0y}^2} = 1 \quad (4)$$

Si las ondas  $E_x$  y  $E_y$  están en fase ( $\epsilon = m\pi$ ), la onda final exhibe polarización lineal. Si  $\epsilon = (m + \frac{1}{2})\pi$  y además  $E_{0x}^2 = E_{0y}^2 = E_0^2$ , la expresión se simplifica a:

$$E_x^2 + E_y^2 = E_0^2 \quad (5)$$

Lo que describe una polarización circular. Estas configuraciones de polarización se pueden inducir mediante diversos mecanismos, como el uso de polarizadores, la reflexión o la birrefringencia.

Un polarizador es un dispositivo que absorbe las componentes del campo eléctrico que oscilan en una dirección específica, permitiendo el paso de aquellas perpendiculares a la dirección de absorción, a la que se denomina eje de transmisión. Como resultado, si luz no polarizada incide sobre un polarizador ideal, la intensidad de la luz emergente se reduce a la mitad de su valor inicial:

$$I = \frac{I_0}{2} \quad (6)$$

Si esta luz ya polarizada (proveniente del primer polarizador) atraviesa un segundo polarizador, conocido como analizador, la intensidad de la nueva onda resultante dependerá del ángulo

relativo entre el eje de transmisión del primer polarizador y el eje de transmisión del analizador. Este fenómeno se describe mediante la Ley de Malus :

$$I = I_0 \cos^2(\theta) \quad (7)$$

Aquí,  $I_0$  es la intensidad de la luz polarizada que incide sobre el analizador, y  $\theta$  representa el ángulo entre la dirección de polarización de esta luz incidente y el eje de transmisión del analizador.

La polarización de la luz también puede ocurrir por reflexión. Cuando la luz no polarizada incide sobre una superficie con un ángulo particular, denominado ángulo de Brewster ( $\theta_B$ ), la onda reflejada se polariza completamente, conteniendo únicamente componentes del campo eléctrico perpendiculares al plano de incidencia. En este ángulo, el rayo reflejado y el refractado son perpendiculares entre sí. Este ángulo está determinado por los índices de refracción de los materiales involucrados, según la siguiente relación:

$$\theta_B = \tan^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right) \quad (8)$$

Donde  $n_1$  es el índice de refracción del medio incidente y  $n_2$  es el índice de refracción del segundo medio.

Por otro lado, la birrefringencia es una propiedad óptica de ciertos materiales (como algunos cristales o plásticos con estructuras moleculares anisotrópicas) que provoca que la luz incidente se refracte en dos direcciones distintas con diferentes velocidades y, generando, diferentes índices de refracción. Esto sucede porque el material interactúa de manera diferente con las componentes del campo eléctrico de la luz según su orientación. En el contexto de la luz polarizada, esto se manifiesta como un cambio en la fase relativa y en el estado de polarización de las componentes de la luz al atravesar el material.

Una aplicación práctica de la birrefringencia es el estudio de la fotoelasticidad . Al someter un material transparente y homogéneo (como ciertos polímeros) a esfuerzos y deformaciones mecánicas, su estructura molecular interna se altera, lo que induce o cambia su birrefringencia. Este cambio puede ser visualizado utilizando luz polarizada, revelando patrones de tensión y compresión dentro del material. Esto es invaluable para el análisis de estrés en el diseño y prueba de componentes mecánicos.

### C. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

#### C-I. Verificación de la Ley de Malus

Se posicionará la lente frente a la fuente luminosa para colimar el haz de luz. Luego, se alinearán los dos polarizadores con el detector de intensidad. El primer polarizador (más cercano a la fuente) se fijará en  $0^\circ$  (eje de transmisión vertical). El segundo polarizador, que actuará como analizador , se rotará desde  $0^\circ$  hasta  $360^\circ$  en intervalos de  $10^\circ$ . La intensidad de la luz transmitida, medida por el detector, se registrará en cada ángulo.

#### C-II. Polarización por Birrefringencia con un Retardador

Se colocará un retardador (por ejemplo, una lámina de  $\lambda/4$ ) entre el polarizador (fijo a  $0^\circ$ ) y el analizador. Inicialmente, el retardador se fijará en una orientación de  $0^\circ$  con respecto al eje de transmisión del polarizador (es decir, su eje rápido o lento estará alineado verticalmente). Se repetirá el procedimiento de rotación del analizador (de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  en intervalos de  $10^\circ$ ), registrando la intensidad en cada paso. Este proceso se replicará para el retardador en posiciones fijas de  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$  y  $50^\circ$  (referidas al ángulo de su eje rápido con respecto al eje de transmisión del polarizador). Se espera observar cómo el estado de polarización de la luz se modifica al pasar por el retardador, lo que afectará la intensidad medida por el analizador.

#### C-III. Demostración de Fotoelasticidad

Se iluminará un objeto de material transparente y birrefringente (como una regla de plástico, una pieza de acrílico o una forma de acetato) utilizando luz polarizada linealmente (se puede usar el polarizador inicial). Se aplicará una deformación mecánica al objeto (por ejemplo, flexión o compresión). Se observarán y registrarán los patrones de colores o bandas que aparecen en el material al ser visto a través del analizador. Estos patrones revelan las líneas de tensión y compresión inducidas por la deformación. Esta sección es principalmente cualitativa y busca la observación del fenómeno.

#### C-IV. Polarización por Reflexión

Se retirarán el polarizador y el retardador. Se montará el analizador en el soporte del detector. Una placa de vidrio (por ejemplo, una lámina de vidrio común de ventana) se colocará en un goniómetro. Se ajustará la posición de la fuente de luz y del goniómetro de modo que el haz de luz incidente forme un ángulo de  $20^\circ$  con la normal de la superficie de la placa. El detector se rotará alrededor del goniómetro hasta que forme un ángulo de  $20^\circ$  con la normal del vidrio (midiendo la luz reflejada). Con el analizador fijado en  $0^\circ$  (eje de transmisión vertical), se registrará la intensidad reflejada. Posteriormente, se rotará la placa de vidrio incrementando el ángulo de incidencia en intervalos de  $1^\circ$ . Para cada nuevo ángulo de incidencia, el detector se girará para mantener el ángulo de reflexión igual al de incidencia (ley de la reflexión), y se tomarán mediciones de intensidad. El procedimiento se repetirá con el analizador fijado en  $90^\circ$  (eje de transmisión horizontal). Se buscará identificar el ángulo de Brewster donde la componente paralela de la luz reflejada es mínima o nula, y la polarización de la luz reflejada es máxima.

#### C-V. Variación de la Intensidad del Rayo Refractado con el Número de Placas

El detector con el analizador a  $0^\circ$  (eje de transmisión vertical) se ubicará directamente detrás de la primera placa de vidrio para medir la intensidad del rayo refractado. Se registrará esta intensidad inicial. Luego, se añadirán placas de vidrio adicionales (del mismo tipo y espesor, por ejemplo, de 5 a 10 placas en total) una por una, colocándolas adyacentes

a la anterior en el camino del haz. Después de cada adición, se registrará la intensidad de la luz transmitida. Este mismo proceso se llevará a cabo con el analizador en  $90^\circ$  (eje de transmisión horizontal). Se analizará cómo la intensidad de la luz refractada disminuye al incrementar el espesor total del medio.

#### D. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para la práctica el dispositivo para medir intensidad de luz lo hace en unidades arbitrarias.

##### D-I. Verificación de la Ley de Malus

En esta parte se intenta observar experimentalmente la teoría que rige la ecuación de Malus (Ec. 7) que sería en este caso:

$$I = I_0 \cos^2(\theta) \quad (9)$$

Donde  $I_0 = 8,8$  que es la intensidad máxima registrada.

Los datos se ven reflejados en la tabla I y donde se hace la comparación teórica con la ecuación y los datos en una gráfica que está en la fig.1.

TABLA I  
VERIFICACIÓN DE LA LEY DE MALUS

| $\theta_{Filtro}(Gra)$ | $I_{Exp}$              |
|------------------------|------------------------|
| 0                      | 8.8                    |
| 10                     | 8.4                    |
| 20                     | 7.6                    |
| 30                     | 6.4                    |
| 40                     | 5.2                    |
| 50                     | 3.6                    |
| 60                     | 2.0                    |
| 70                     | 0.8                    |
| 80                     | 0.2                    |
| 90                     | 0.0                    |
| 100                    | 0.2                    |
| 110                    | 0.8                    |
| 120                    | 2.2                    |
| 130                    | 3.6                    |
| 140                    | 5.2                    |
| 150                    | 6.6                    |
| 160                    | 7.8                    |
| 170                    | 8.4                    |
| 180                    | 8.8                    |
| 190                    | 8.4                    |
| 200                    | 7.8                    |
| 210                    | 6.6                    |
| 220                    | 5.0                    |
| 230                    | 3.4                    |
| 240                    | 2.0                    |
| 250                    | 0.8                    |
| 260                    | 0.2                    |
| 270                    | 0.0                    |
| 280                    | 0.2                    |
| 290                    | 0.8                    |
| 300                    | 2.0                    |
| 310                    | 3.6                    |
| 320                    | 5.2                    |
| 330                    | 6.4                    |
| 340                    | 7.8                    |
| 350                    | 8.6                    |
| 360                    | 8.8                    |
| $\Delta \theta = 2$    | $\Delta I_{Exp} = 0,2$ |

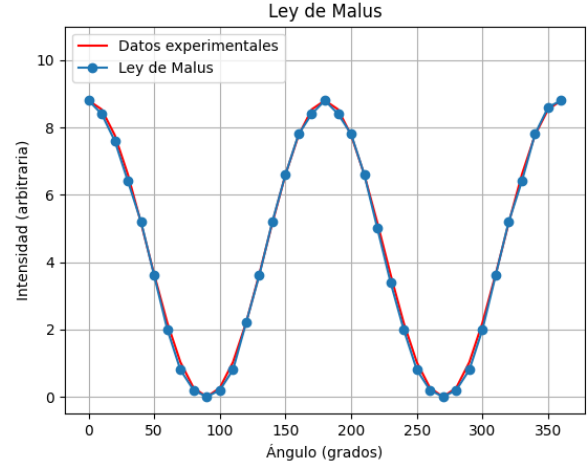


Fig. 1. Gráfica experimental y teórica de la Ley de Malus

##### D-II. Polarización por Birrefringencia con un Retardador

Los datos se ven reflejados en la tabla II y donde se hace la comparación de la intensidad de varios ángulos del filtro polarizador para diferentes ángulos del retardador y los datos en una gráfica que está en la figura 2.

TABLA II  
POLARIZACIÓN POR BIRREFRINGENCIA CON UN RETARDADOR

|                        | 0°                     | 10°                | 20°                | 30°                | 40°                | 50°                |
|------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $\theta_{Filtro}(Gra)$ | $I_{Exp,0^\circ}$      | $I_{Exp,10^\circ}$ | $I_{Exp,20^\circ}$ | $I_{Exp,30^\circ}$ | $I_{Exp,40^\circ}$ | $I_{Exp,50^\circ}$ |
| 0                      | 8.0                    | 7.4                | 6.0                | 4.6                | 3.8                | 4.0                |
| 10                     | 7.8                    | 7.6                | 6.8                | 5.2                | 4.0                | 3.6                |
| 20                     | 7.2                    | 7.6                | 7.0                | 5.4                | 4.2                | 3.2                |
| 30                     | 6.2                    | 7.0                | 6.8                | 5.8                | 4.4                | 3.0                |
| 40                     | 4.8                    | 6.2                | 6.4                | 5.8                | 4.6                | 3.0                |
| 50                     | 3.4                    | 4.8                | 5.6                | 5.6                | 4.6                | 3.0                |
| 60                     | 2.2                    | 3.6                | 4.8                | 5.0                | 4.6                | 3.0                |
| 70                     | 1.0                    | 2.4                | 3.6                | 4.4                | 4.2                | 3.2                |
| 80                     | 0.2                    | 1.2                | 2.6                | 3.8                | 4.2                | 3.6                |
| 90                     | 0.0                    | 0.4                | 1.8                | 3.2                | 4.0                | 4.0                |
| 100                    | 0.2                    | 0.2                | 1.2                | 2.6                | 3.8                | 4.2                |
| 110                    | 0.8                    | 0.4                | 1.0                | 2.2                | 3.6                | 4.4                |
| 120                    | 1.6                    | 0.8                | 1.0                | 2.0                | 3.2                | 4.6                |
| 130                    | 3.0                    | 1.8                | 1.4                | 2.0                | 3.2                | 4.6                |
| 140                    | 4.4                    | 3.0                | 2.2                | 2.2                | 3.2                | 4.8                |
| 150                    | 5.6                    | 4.2                | 3.0                | 2.6                | 3.2                | 4.6                |
| 160                    | 6.8                    | 5.4                | 4.0                | 3.2                | 3.2                | 4.4                |
| 170                    | 7.4                    | 6.6                | 5.2                | 4.0                | 3.4                | 4.2                |
| 180                    | 8.0                    | 7.4                | 5.8                | 4.6                | 3.6                | 3.8                |
| $\Delta \theta = 2$    | $\Delta I_{Exp} = 0,2$ |                    |                    |                    |                    |                    |

##### D-III. Demostración de Fotoelasticidad

En esta parte se tiene una demostración más visual que otra cosa, se observa en la figura 3 que para un plástico algo rígido al aplicarle presión se puede ver una alteración en el patrón de los colores que se observan.

##### D-IV. Polarización por Reflexión

Los datos se ven reflejados en la tabla III y donde se hace la comparación para dos posiciones del filtro polarizador, midiendo la intensidad a medida que se va girando un cristal

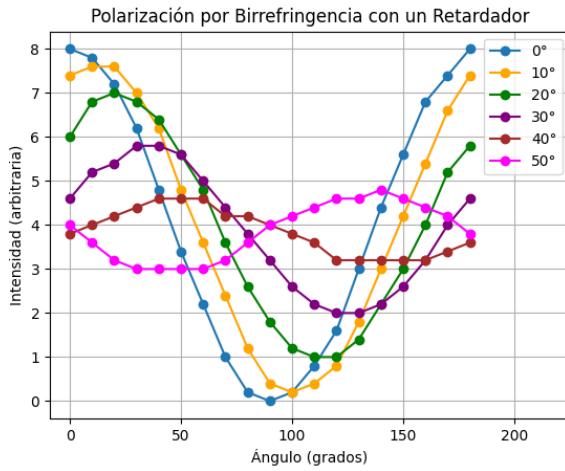


Fig. 2. Gráfica experimental de polarización por birrefringencia con un retardador

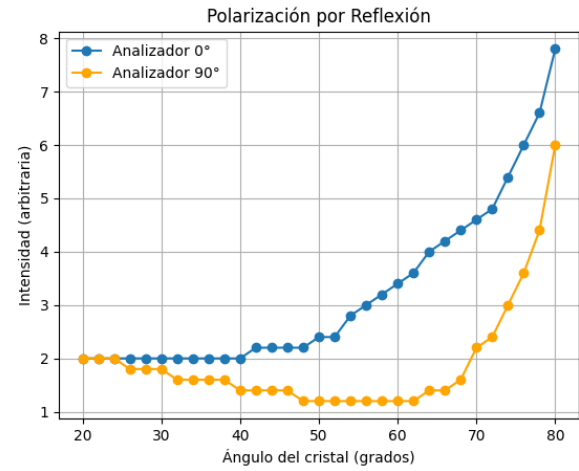


Fig. 4. Gráfica experimental de polarización por reflexión.



Fig. 3. Visualización de Fotoelasticidad

en el cual refleja la luz para poder medir el ángulo de Brewster, donde los datos se ven comparados en una gráfica de la figura 4.

Para este caso, el ángulo de Brewster sería con  $n_1 = 1$  y  $n_2 = 1,5$ , para el aire y el cristal, respectivamente:

$$\theta_B = \tan^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right) = 56,3^\circ \quad (10)$$

Y donde de forma media para las intensidades menores de con el analizador a  $90^\circ$  el ángulo experimental sería  $\theta_{B,Exp} = 55,0$

$$Discrepancia = \frac{|56,3 - 55,0|}{56,3} \times 100\% \approx 2,31\% \quad (11)$$

TABLA III  
POLARIZACIÓN POR REFLEXIÓN

| $\theta_{Cristal}(Gra)$ | $\theta_{Filtro, 0^\circ}(Gra)$ | $I_{Exp, 90^\circ}$ |
|-------------------------|---------------------------------|---------------------|
| 54                      | 0.0                             | 2.0                 |
| 20                      | 0.0                             | 2.0                 |
| 22                      | 0.0                             | 2.0                 |
| 24                      | 0.0                             | 1.8                 |
| 26                      | 0.0                             | 1.8                 |
| 28                      | 0.0                             | 1.8                 |
| 30                      | 0.0                             | 1.6                 |
| 32                      | 0.0                             | 1.6                 |
| 34                      | 0.0                             | 1.6                 |
| 36                      | 0.0                             | 1.6                 |
| 38                      | 0.0                             | 1.4                 |
| 40                      | 0.2                             | 1.4                 |
| 42                      | 0.2                             | 1.4                 |
| 44                      | 0.2                             | 1.4                 |
| 46                      | 0.2                             | 1.2                 |
| 48                      | 0.4                             | 1.2                 |
| 50                      | 0.4                             | 1.2                 |
| 52                      | 0.8                             | 1.2                 |
| 56                      | 1.0                             | 1.2                 |
| 58                      | 1.2                             | 1.2                 |
| 60                      | 1.4                             | 1.2                 |
| 62                      | 1.6                             | 1.2                 |
| 64                      | 2.0                             | 1.4                 |
| 66                      | 2.2                             | 1.4                 |
| 68                      | 2.4                             | 1.6                 |
| 70                      | 2.6                             | 2.2                 |
| 72                      | 2.8                             | 2.4                 |
| 74                      | 3.4                             | 3.0                 |
| 76                      | 4.0                             | 3.6                 |
| 78                      | 4.6                             | 4.4                 |
| 80                      | 5.8                             | 6.0                 |
| $\Delta \theta = 2$     | $\Delta I_{Exp} = 0,2$          |                     |

D-V. Variación de la Intensidad del Rayo Refractado con el Número de Placas

Los datos se ven reflejados en la tabla IV y donde se hace la comparación de la intensidad de varios ángulos del filtro

polarizador para varias placas de vidrio y los datos en una gráfica que está en la figura 5.

TABLA IV  
 VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD DEL RAYO REFRACTADO CON EL  
 NÚMERO DE PLACAS

| Numero de placas    | $I_{Exp,0^\circ}$      | $I_{Exp,45^\circ}$ | $I_{Exp,90^\circ}$ |
|---------------------|------------------------|--------------------|--------------------|
| 0                   | 6.0                    | 2.8                | 0.0                |
| 1                   | 5.2                    | 2.4                | 0.0                |
| 2                   | 4.4                    | 2.0                | 0.0                |
| 3                   | 3.6                    | 1.6                | 0.0                |
| 4                   | 2.8                    | 1.2                | 0.0                |
| 5                   | 2.4                    | 1.0                | 0.0                |
| 6                   | 1.8                    | 0.8                | 0.0                |
| 7                   | 1.4                    | 0.6                | 0.0                |
| 8                   | 1.0                    | 0.4                | 0.0                |
| 9                   | 0.6                    | 0.2                | 0.0                |
| 10                  | 0.4                    | 0.2                | 0.0                |
| 11                  | 0.2                    | 0.0                | 0.0                |
| 12                  | 0.0                    | 0.0                | 0.0                |
| $\Delta \theta = 2$ | $\Delta I_{Exp} = 0,2$ |                    |                    |

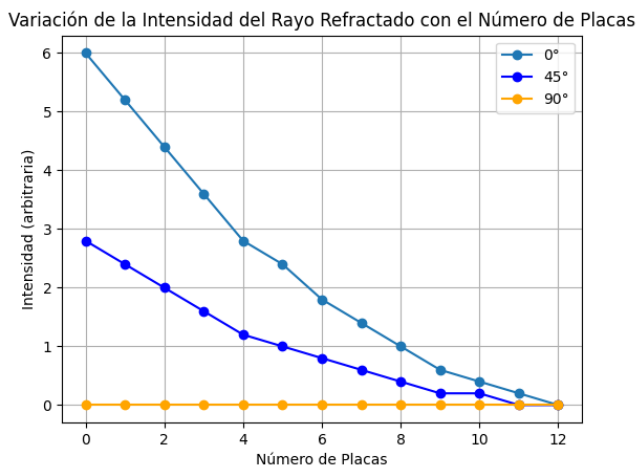


Fig. 5. Gráfica experimental de la variación de la intensidad del rayo refractado con el número de placas.

## CONCLUSIONES

Los experimentos realizados confirmaron exitosamente los principios teóricos de la polarización de la luz.

- La Ley de Malus fue validada experimentalmente, demostrando la relación cuadrática entre la intensidad de la luz transmitida y el coseno del ángulo entre los ejes de transmisión del polarizador y el analizador. Los datos experimentales mostraron una excelente correlación con la curva teórica.
- La investigación sobre la polarización por birrefringencia con un retardador ilustró cómo ciertos materiales alteran el estado de polarización de la luz, observándose cambios en la intensidad transmitida al variar su orientación.
- Se realizó la Demostración de Fotoelasticidad, donde se observó que al aplicar deformación mecánica a un ma-

terial plástico transparente, se generaron y visualizaron diferentes patrones de colores o bandas. Estos patrones revelaron las líneas de tensión y compresión inducidas por la deformación, demostrando la aplicación práctica de la birrefringencia para el análisis de estrés.

- El análisis de la polarización por reflexión permitió la validación del ángulo de Brewster. El ángulo experimental de  $55,0^\circ$  estuvo muy cerca del valor teórico de  $56,3^\circ$ , con una baja discrepancia del 2,31 %, confirmando la polarización perpendicular de la luz reflejada en este ángulo.
- La cuantificación de la variación de la intensidad del rayo refractado con el número de placas transparentes demostró que la intensidad de la luz transmitida disminuye progresivamente a medida que aumenta el espesor del medio.

En conjunto, estos experimentos proporcionan una sólida base empírica para comprender la naturaleza ondulatoria de la luz y los fenómenos de polarización, birrefringencia y reflexión, fundamentales en el estudio de la óptica.

## REFERENCIAS

- [1] F. W. Sears, M. W. Zemansky, H. D. Young, and R. A. Freedman, *Física Universitaria con Física Moderna*, 12th ed. México: Pearson Educación, 2009, vol. 2.
- [2] D. Halliday, R. Resnick, and J. Walker, *Fundamentals of Physics*, 10th ed. United States of America: Wiley, 2014, vol. Extended.
- [3] R. A. Serway and J. W. Jewett, *Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna*, 7th ed. México: Cengage Learning, 2009, vol. 2.
- [4] J. Martín and F. Dugarte, *Guías de laboratorio (Laboratorio III)*, Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, (Material no publicado).
- [5] E. Hecht, *Optics*, 4th ed. USA: Addison-Wesley, 2002.
- [6] A. Contreras, *Practica de laboratorio: Polarizacion de la Luz (Laboratorio III)*, Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, (Material no publicado).