

## 4. Ley de Malus

### 4.1 Objetivos

#### 4.1.1 General

Estudio experimental de la ley de Malus para un polarizador lineal.

#### 4.1.2 Específicos

- Medición directa de la intensidad de luz usando luxómetros y ángulos entre polarizadores usando sensores inalámbricos de rotación.
- Estudio del fenómeno de polarización de ondas electromagnéticas -luz visible-.
- Uso de las TIC en el aprendizaje de la ciencia - física.

### 4.2 Referentes Conceptuales y Marco Teórico

La polarización es un fenómeno exclusivamente ondulatorio, es decir, los fenómenos físicos caracterizados por tener una naturaleza ondulatoria, son los únicos que se puede llegar a presentar una polarización. Adicionalmente, no todas las ondas pueden ser polarizadas, solamente las ondas transversales.

Las ondas electromagnéticas están compuestas por una onda eléctrica  $\vec{E}$  y una onda magnética  $\vec{B}$  vibrando perpendicularmente entre sí, y ambos campos perpendiculares a su vez a la dirección de propagación como se observa en la figura 4.1.

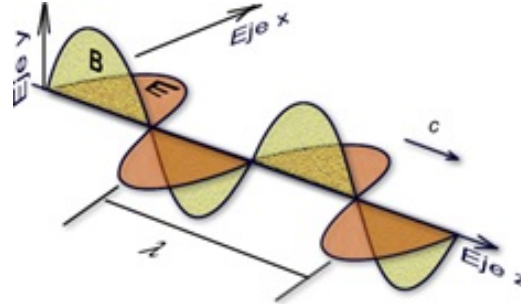
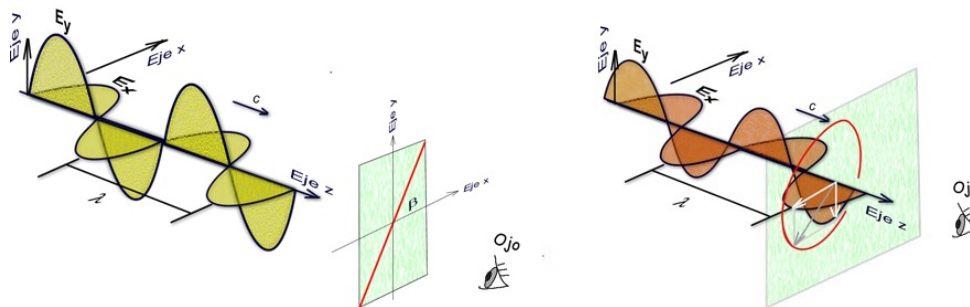


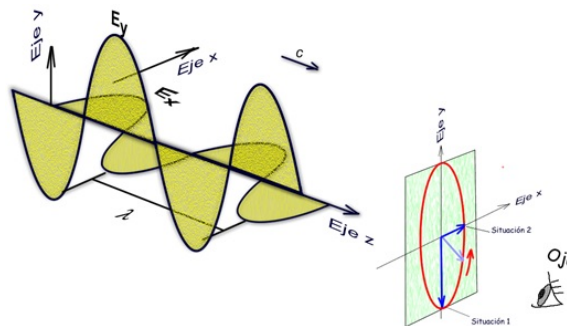
Figura 4.1: Onda electromagnética propagándose a lo largo de la dirección z.

La polarización de una onda electromagnética está definida por el campo eléctrico  $\vec{E}$ . Ello implica que si la punta del campo eléctrico en un punto fijo de la dirección de propagación dibuja una elipse, un círculo ó un segmento recto, entonces la onda se encuentra polarizada de alguna de esas manera. Observe la figura 4.2.



(a) Onda con polarización lineal.

(b) Onda con polarización circular.



(c) Onda con polarización elíptica.

Figura 4.2: Polarización de una onda definida por el campo eléctrica  $\vec{E}$ .

## 4.2 Referentes Conceptuales y Marco Teórico

27

Dentro de las propiedades más importantes de una onda electromagnética, se encuentra la polarización y el color. Para detectar si una fuente de luz se encuentra polarizada se requiere usar dispositivos experimentales como analizadores (polarizadores). Aunque, algunos tipos de abejas y mariposas tienen la capacidad natural en sus ojos de poder ver la polarización de la luz, los humanos carecen de dicha capacidad.

Para dar una descripción matemática de la polarización, podemos realizar una formulación sinusoidal de cualquiera de las ondas eléctricas planas de la figura 4.2, dada por la componente en la dirección  $x$ :

$$\vec{E}_x = E_{0x} \sin(kz - \omega t) \quad (4.1)$$

y la componente en la dirección  $y$ .

$$\vec{E}_y = E_{0y} \sin(kz - \omega t + \delta) \quad (4.2)$$

Donde  $\delta$  es la diferencia de fase entre las dos ondas de la ecuación 4.1 y 4.2. Una combinación lineal de las dos ondas representadas en estas ecuaciones permite llegar a la ecuación de una elipse.

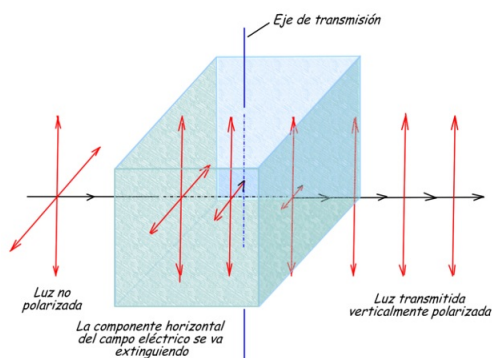
$$\frac{E_x^2}{E_{0x}^2} + 2 \frac{E_x E_y}{E_{0x} E_{0y}} + \frac{E_y^2}{E_{0y}^2} = \sin^2(\delta) \quad (4.3)$$

Es decir, la polarización será elíptica, la punta del vector de campo eléctrico  $\vec{E}$ , dibuja una elipse que gira con una frecuencia angular  $\omega$ ; elipse que en general posee sus ejes principales rotados con respecto a los ejes del plano cartesiano  $XY$ . Vea la figura 4.2(c).

Casos particulares de esta polarización son la polarización lineal y la polarización circular, dependiendo esto de la diferencia de fase  $\delta$ . Por ejemplo con  $\delta = 0$  ó  $\delta = \pi$  la ecuación 4.3 se reduce a la ecuación de una línea recta, una polarización lineal como la que se observa en la figura 4.2(a). Si  $\delta = \pm\pi/2$  y con  $E_{0x} = E_{0y}$  la ecuación 4.3 se reduce a la ecuación de la circunferencia, polarización circular como la que se observa en la figura 4.2(b).

Un mecanismo relevante de polarización es la polarización lineal por dicroísmo; cierto tipo de materiales, y gracias a su conformación molecular dejan pasar luz cuya dirección de polarización lineal corresponde a la dirección de un eje denominado **eje de transmisión** y absorbe la luz en una dirección de polarización lineal, perpendicular a este, denominado **eje de extinción**, tal como se observa en la figura 4.3(a). Experimentalmente se evidencia este fenómeno en los vidrios polaroides ó polarizadores<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Película de polivinilo con cristales microscópicos fuertemente dicroicos (generalmente sales de yodo). Orientados adecuadamente al estirar o laminar el soporte plástico



(a) Material que presenta dicroísmo.



(b) Dos láminas polarizadoras superpuestas, al rotarlas sus ejes de transmisión cambian de ángulo lo que hace que la intensidad de la luz que atraviesa disminuya; al quedar cruzados perpendicularmente no pasa luz.

Figura 4.3: Polarización lineal por dicroísmo.

Cuando sobre un polarizador lineal incide luz linealmente polarizada en una dirección que forma un ángulo  $\phi$  con el eje de transmisión, figura 4.4, al atravesarlo cambiará su dirección de polarización a la dirección del eje de transmisión y quedará debilitada en intensidad siendo afectada por un factor proporcional al  $\cos^2(\phi)$ .

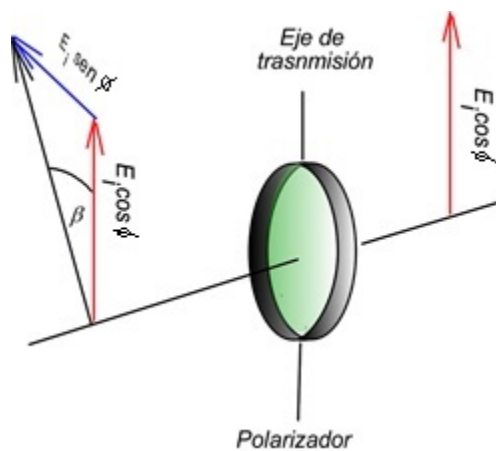


Figura 4.4: Efecto producido en el campo eléctrico de una onda electromagnética al pasar a través de un polaroide.

$$I = I_{max} \cos^2(\phi) \quad (4.4)$$

Donde  $I_{max}$  es el valor promedio de la intensidad de luz incidente e  $I$  la intensidad de la luz que logra atravesar el polarizador. La expresión en la ecuación 4.4 es conocida como ley de Malus, en honor al físico e ingeniero militar francés del ejército de Napoleón, Étienne Louis Malus (París, 1775-1812), quien fue el que la formuló.

### 4.3 Actividades Previas al Laboratorio

Use sus apuntes de clase, lecturas adicionales, referencias bibliográficas propuestas en esta guía y/o adicionales, para contestar en forma adecuada las situaciones relacionadas con la densidad de diferentes sólidos y fluidos, propuestas a continuación:

1. Partiendo de las ecuaciones 4.1 y 4.2, deduzca la ecuación de la elipse de polarización 4.3.
2. Dadas las componentes del campo eléctrico de una onda electromagnética:

$$\vec{E}_x = E_0 \sin(kz - \omega t)$$

$$\vec{E}_y = 3E_0 \sin(kz - \omega t + \pi)$$

Demuestre que la onda tiene una polarización lineal que cumple con:

$$E_y = -3E_x$$

Y encuentre el ángulo de la línea de polarización respecto al eje  $x$

### 4.4 Materiales

Para la práctica de laboratorio se necesitan los siguientes elementos:

1. Fuente de luz con un selector de diferentes objetos.
2. Fuente de poder para el selector de luz (adaptador AC/DC).
3. Selector de aperturas de diferentes diámetros.
4. Sensor de luz y color Vernier Go Direct.
5. Sensor de rotación Vernier Go Direct con accesorios.
6. Soporte para sensor de Luz.
7. Riel óptico con una longitud de 122 cm.
8. Dos polarizadores lineales de luz uno con soporte para sensor de rotación.
9. Computador con puerto USB disponible ó dispositivo móvil (smartphone, tablet, etc) con Vernier Graphical Analysis. Descárguela [aquí para Windows/macOS](#) ó en la tienda que corresponda (AppStore / Google Play) para su dispositivo móvil.
10. Guía de Laboratorio.



Figura 4.5: Materiales de laboratorio.

## 4.5 Procedimiento

Para conseguir resultados adecuados tenga presente los siguientes pasos.

1. Tome las dos piezas del soporte para sensor y ajústelas como se observa en la figura 4.6, tenga presente las flechas que indican la dirección correcta.

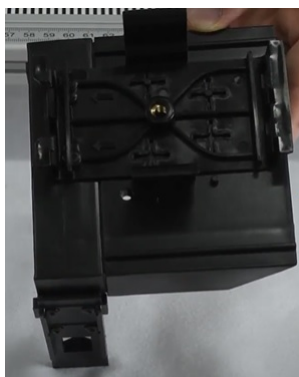


Figura 4.6: Soporte para el sensor de luz y color.

2. Ajuste el sensor de luz y color en el soporte colocándolo en la parte superior y aplicando un poco presión sobre el el resultado final se observa en la figura 4.7.

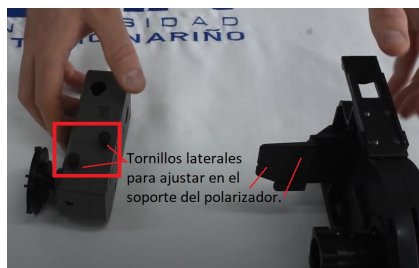


Figura 4.7: Configuración final del sensor de luz y color en el soporte.

3. Tome el sensor de rotación Vernier Go Direct e instale en él sus accesorios; la polea ajustada con el tornillo de sujeción como se observa en la figura 4.8(a) y la banda de caucho para su respectiva instalación sobre el polarizador con base. Coloque los tornillos laterales que trae la base del polarizador en la parte posterior del sensor, identificando la posición adecuada. Vea la figura 4.8(b).



(a) Instalación de polea en sensor de rotación.



(b) Identificación de los tornillos de sujeción en ambos dispositivos.

Figura 4.8: Instalación adecuada del sensor de rotación Vernier Go Direct.

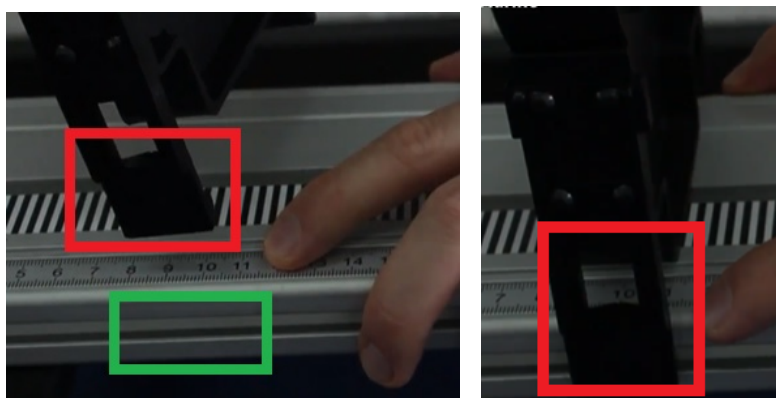
4. Coloque adecuadamente el sensor de rotación, garantizando que la banda quede en el calan de la polea y en el canal del polarizador observe con atención las figuras 4.9(a) y 4.9(b). En la figura 4.9(c) se puede observar el aspecto final del montaje del sensor en el polarizador.



(a) Ajuste del sensor en la base del polarizador con los tornillos de sujeción. (b) Instalación de la banda en los canales de la polea y el polarizador. (c) Aspecto final del montaje.

Figura 4.9: Instalación adecuada del sensor de rotación Vernier Go Direct sobre la base del polarizador.

5. Tome el riel óptico y sobre él instale la fuente de luz con el selector de diferentes objetos. Para ello basta con colocar el pin del soporte de la fuente de luz -resaltado en cuadro en color rojo en la figura 4.10(a)- sobre la canal lateral del riel óptico enmarcado en el cuadro verde de la figura 4.10(a). Debe asegurarse que el pin quede bien insertado en ambos costados del riel óptico y que sea fácil desplazar la fuente de luz a lo largo del riel, simplemente deslizando la fuente de luz. Recuerde que en ningún procedimiento debe hacer fuerza excesiva, las presiones que debe hacer son supremamente leves. Ajuste la posición de la fuente de luz a la marca de 10 cm en la cinta métrica del riel óptico como se observa en la figura 4.10(b).



(a) Instalación de la fuente de luz en el riel óptico. (b) Ubicación en la marca de 10 cm.

Figura 4.10: Instalación adecuada de la fuente de luz con selector de objetos en el riel óptico.



6. De manera análoga instale sobre el riel óptico el selector de aberturas ajustándolo en la marca de 15 cm y seleccionado la abertura circular mas pequeña posible. También, instale sobre el riel óptico el polarizador con el sensor de rotación en la marca de 30 cm, el segundo polarizador en la marca de 40 cm y por último el sensor de luz junto con su soporte en la marca de 45 cm o lo mas cerca posible del segundo polarizador. El montaje final tiene el aspecto que se muestra en la figura 4.11.



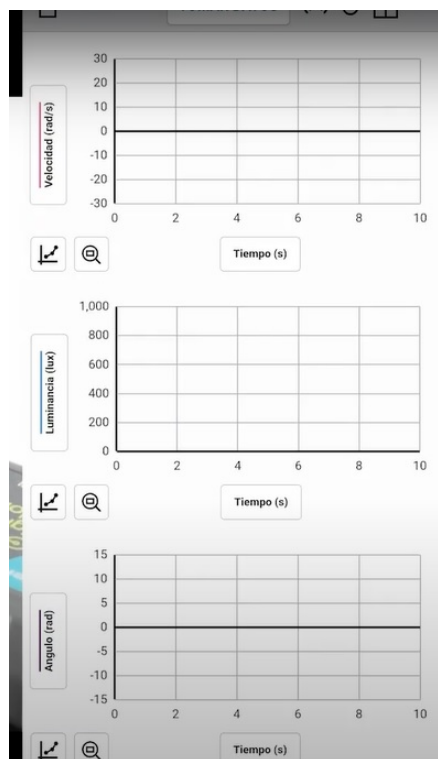
Figura 4.11: Montaje experimental.

7. Antes de continuar asegúrese de instalar en el dispositivo a usar la aplicación Vernier Graphical Analysis. Descárguela [aquí para Windows/macOS](#) ó en la tienda que corresponda (AppStore / Google Play) para su dispositivo móvil.
8. Conecte los sensores de luz y de rotación al PC o dispositivo móvil, bien sea mediante cable USB ó mediante una conexión bluetooth.
9. Abra la aplicación Vernier Graphical Analysis y asegúrese que el software a detectado los dos sensores conectados. Vea la figura 4.12.



Figura 4.12: Ejemplo de conexión bluetooth para los dos sensores.

10. Al conectar por defecto observará tres gráficas en función del tiempo como se aprecia en la figura 4.13(a). Para esta experiencia no nos interesará mediciones a lo largo del tiempo. Para cambiar las opciones desde el menú principal de la aplicación en el recuadro verde de la figura 4.13(b) podemos seleccionar metros -recuadro rojo de la figura 4.13(b)-.



(a) Gráficas por defecto en el programa.



(b) Selección de opciones de solo medida.

Figura 4.13: Configuración y selección de las opciones en Vernier Graphical Analysis.

**IMPORTANTE:** El sensor de luz es capaz de medir cantidades muy pequeñas de intensidad de luz ó luminancia. Por lo cual es recomendable medir los datos experimentales en condiciones de oscuridad total, en lo posible trate de oscurecer al máximo el recinto donde realizará la práctica.

11. Los valores de la luminancia se muestran en lux, y los de ángulo se muestran en radianes (vea figura 4.14(a)). Para calibrar el sensor de rotación haga click sobre el cuadro rojo del sensor y seleccione las unidades de grados. Antes de iniciar las medidas es necesario calibrar ambos sensores: para la calibración del sensor de rotación ajuste el ángulo entre los polarizadores a  $0^\circ$  y haga click sobre el recuadro rojo del Ángulo y calíbrelo a cero. Luego ajuste el ángulo  $90^\circ$  entre los polarizadores y haga click sobre el recuadro rojo de Luminancia calíbrelo a cero.

(vea figura 4.14(b)).



Figura 4.14: Configuración y selección de las opciones en Vernier Graphical Analysis.

12. Antes de iniciar las mediciones experimentales, conecte en la parte posterior el adaptador de corriente a la fuente de luz y asegúrese de encender la misma usando el interruptor como se observa en la figura 4.15.



Figura 4.15: Ajuste de opciones del programa.

13. Una vez adecuado todo el montaje ajuste el ángulo entre los polarizadores a  $0^\circ$ , encienda la luz y observe la medición de Luminancia y ángulo que muestra la aplicación Vernier Graphical Analysis y regístrela en la tabla 4.1.

14. Cambie el ángulo entre los polarizadores aproximadamente a  $5^\circ$  espere que se establezca las mediciones de los dos sensores como se observa en la figura 4.16, nuevamente observe la medición de Luminancia y ángulo que muestra la aplicación Vernier Graphical Analysis y regístrela en la tabla 4.1.

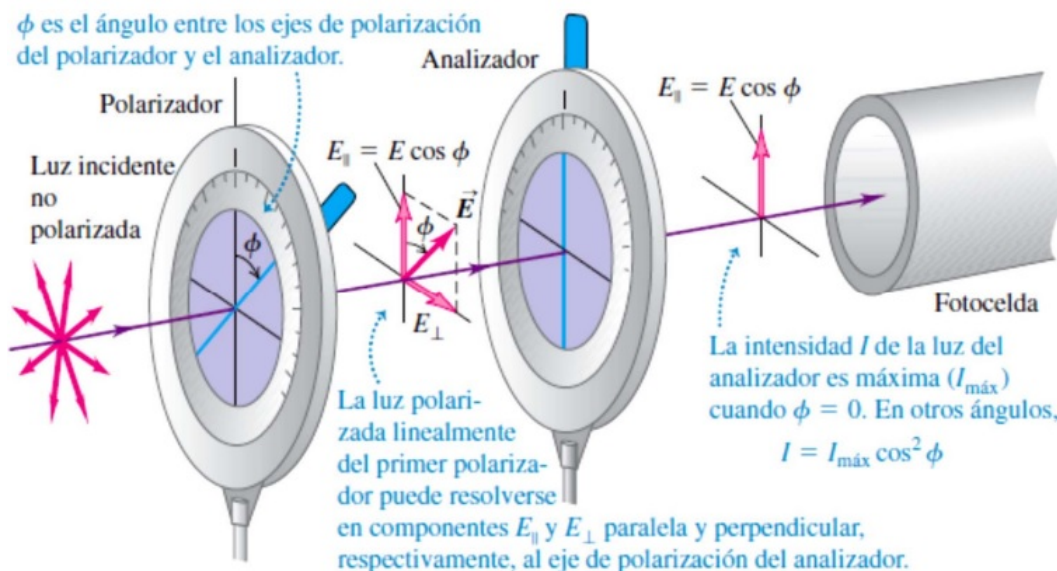


Figura 4.16: Explicación del experimento.

15. Repita el numeral anterior para unos 70 u 80 datos con diferentes ángulos entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$ , consígnelos todos en la tabla 4.1.

Ángulo $\phi$ ( $^\circ$ )	Luminancia ( $lux$ )

⋮


Tabla 4.1: Datos experimentales.

#### 4.6 Análisis Cuantitativo y Cualitativo

1. Utilice los datos experimentales registrados en la tabla 4.1 y construya un gráfico de Intensidad de luz (*Luminancia*) vs ángulo ( $\phi$ ) entre los polarizadores. ¿Qué puede concluir de este gráfico?
2. Utilice los datos experimentales registrados en la tabla 4.1 y construya un gráfico Intensidad de luz (*Luminancia*) vs  $\cos^2(\phi)$ .
3. Realice un ajuste de regresión lineal de mínimos cuadrados para la gráfica anterior y obtenga la ecuación que mejor se ajusta a los datos experimentales.
4. Por comparación directa con la ecuación 4.4. ¿Qué interpretación puede dar al resultado obtenido? ¿Cuál es la máxima intensidad de luz detectada por el sensor? ¿Cómo la determinó?.
5. ¿Qué tan bien se ajustan los sus datos experimentales a la ley de Malus? Explique en detalle sus respuestas.

#### 4.7 Referencias

1. Hecht, E. (2019). *Optics* (5<sup>a</sup> ed.). Pearson Education.
2. DeCusatis, C. (1998). *Handbook of applied photometry*. New York: Optical Society of America OSA.
3. Tipler, P. A. (2010). *Física. 6ed. Vol. 2*. Reverté.