

Universidad de Santiago de Compostela  
Facultad de Física — Laboratorio de Óptica

---

# Polarización

---

Pedro Martínez Caamaño

Marzo 2026

# 1. Introducción

## 1.1. Objetivo y Principios

El objetivo de esta práctica es estudiar los diferentes estados de polarización que puede presentar la luz, así como el análisis y validez de la Ley de Malus.

Luz es una onda electromagnética que se desplaza por el espacio oscilando su vector de campo eléctrico perpendicular a la dirección en la que se propaga. El cómo se comporta en el tiempo y en su forma la dirección de este campo eléctrico en un plano perpendicular a la dirección de propagación viene dado por el estado de polarización. Aunque la luz natural no está polarizada (ya que su campo eléctrico vibra en todas las direcciones transversales posibles de forma aleatoria), con uso de ciertas componentes, como los reflejos sobre superficies o los filtros polarizadores, es posible polarizar esta luz y alterar su estado de polarización con uso de láminas retardadoras.

La manera en la que evoluciona el vector de campo eléctrico da lugar a distintos tipos de polarización: lineal, circular o elíptica (dependiendo de la forma que dibuja en este plano perpendicular a la dirección de propagación).

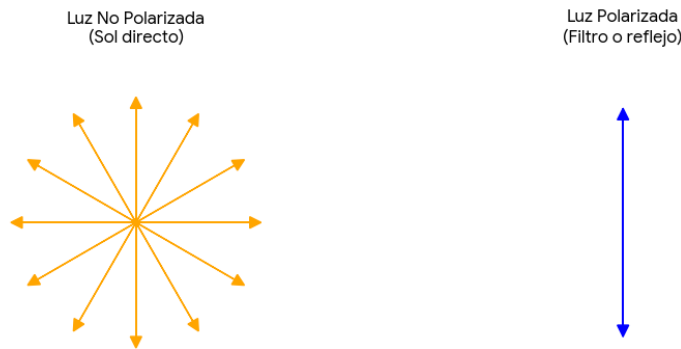


Figura 1: Representación gráfica del vector campo eléctrico en distintos estados.

Los polarizadores lineales nos permiten filtrar esta luz tal que solo pase aquella polarizada paralelamente a los ejes del filtro; luego, debido a esta filtración, solo llega la mitad de la Intensidad original al otro lado. En cambio, cuando un haz de luz linealmente polarizada se encuentra a un polarizador, la intensidad que se transmite viene dada por el ángulo entre los ejes de transmisión por la Ley de Malus:

$$I = I_0 \cos^2(\theta) \quad (1)$$

A mayores, haremos uso también de una lámina retardadora de cuarto de onda, que introduce un desfase relativo de  $90^\circ$  entre dos componentes ortogonales del campo eléctrico, permitiendo convertir luz linealmente polarizada en luz con polarización elíptica o circular (dependiendo del ángulo del eje de polarización de la luz incidente y los ejes de la lámina).

Para conocer los ejes relativos de dos polarizadores, siguiendo la ley de Malus, situándolos uno frente al otro y rotándolos, encontraremos un mínimo de intensidad allá donde sus ejes formen  $90^\circ$ . Pero para saber sus ejes absolutos, usaremos el conocido ángulo de Brewster.

Este es el ángulo aquel en el que un haz de luz incide sobre un medio (produciendo dos haces, uno que se refleja al mismo medio y otro que se refracta al pasar al otro medio) tal que la componente magnética transversal no se refleja (la eléctrica transversal sí, una parte). Esto quiere decir que, bajo este ángulo, la luz que se refleja está linealmente polarizada paralela a la superficie de incidencia. Se define:

$$r_{TM}(\theta_B) = 0 \iff \operatorname{tg}(\theta_B) = \frac{n_2}{n_1} \text{ tal que } \theta_B + \theta_r = \frac{\pi}{2} \quad (2)$$

Por lo que, observando el reflejo sobre un vidrio o agua desde el aire, a cierto ángulo, con el polarizador, haremos desaparecer tal reflejo si situamos el eje del polarizador perpendicular al vector campo eléctrico del haz reflejado, es decir, paralelo al eje de donde viene el rayo.

## 2. Material y métodos

### 2.1. Montaje experimental

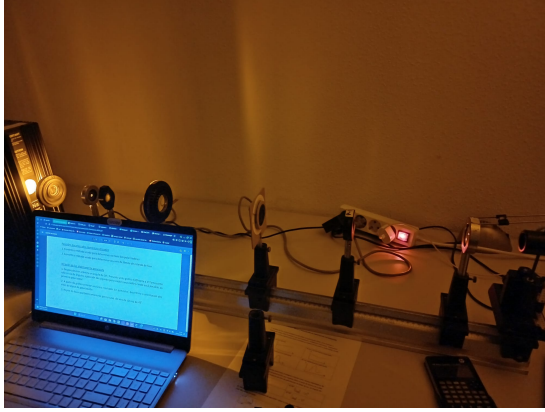
El material del que disponemos es el siguiente:

- Fuente de luz (lámpara de sodio de baja presión de 589 nm principalmente)
- Lámina retardadora de cuarto de onda para luz de sodio
- Dos polarizadores lineales
- Filtro pasa-baja
- Banco Óptico
- Tres lentes convergentes
- Aberturas circulares
- Detector de potencia de Radiación

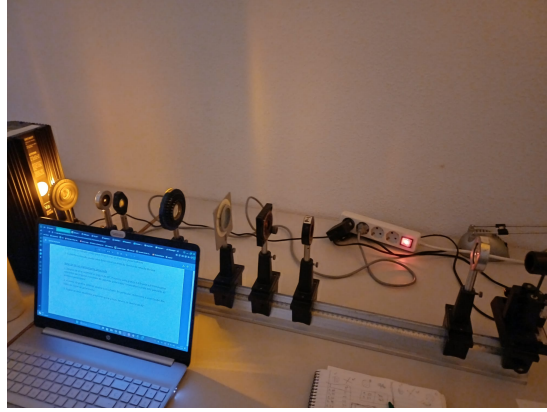
Nuestro método será el de generar un haz de luz colimado y utilizar los polarizadores lineales para estudiar la Ley de Malus. Para estudiar la relación intensidad-ángulo de polarizaciones circular y elíptica introduciremos la lámina retardadora.

### 2.2. Procedimiento

Generamos el haz de luz colimado de la siguiente forma: en nuestro banco óptico, de forma que haya buena alineación lateral y vertical, situamos la lámpara de sodio y a continuación el filtro pasa baja (que elimina las líneas intensas producidas por el sodio). Tras ello, la primera lente convergente (llamada lente condensadora), que hace converger la luz sobre una pantalla, esta pantalla tiene un pequeño orificio por el que escapa esta luz hacia la siguiente lente (la lente colimadora) tal que la pantalla está en el plano focal de la lente colimadora. El haz colimado ya está producido, situamos nuestros elementos de la práctica que necesitemos: polarizadores lineales, lámina retardadora etc. Al final, se coloca la tercera lente convergente (la lente colectora de radiación) que hace converger la luz sobre el detector que se coloca a continuación a la distancia focal de la lente colectora.



(a) Montaje con los dos polarizadores lineales.



(b) Montaje con los dos polarizadores lineales y la lámmina retardadora.

Comenzamos con las medidas de la Ley de Malus, hacemos uso de los dos polarizadores lineales y vamos registrando la intensidad medida en función de la inclinación del filtro analizador (el polarizador lo dejamos quieto, únicamente giramos el segundo), por una vuelta completa.

Después, introducimos la lámmina retardadora inclinada, primero  $30^\circ$  y luego  $45^\circ$  para generar luz polarizada elíptica y circularmente respectivamente y así hacer las mismas medidas que antes: girar el analizador, medir la intensidad que llega al sensor.

Es así que, para saber el ángulo de inclinación del analizador respecto al primer polarizador, tendremos que conocer los ejes de este. Para ello usamos un método sencillo. Colocamos los filtros polarizadores de manera que no pase luz ( $90^\circ$  de diferencia de ángulo entre ellos) y luego situamos la lámmina retardadora de cuarto de onda y la vamos girando hasta que la luz vuelva a no pasar. Cuando esto ocurra, significa que uno de los ejes de la lámmina retardadora está alineado con el polarizador; así hemos encontrado los ejes relativos de la lámmina (pero aún no sabemos cual es el eje rápido y cual es el eje lento).

Para saber los ejes reales de los polarizadores (pues los relativos, los sabremos con la ley de Malus), haremos uso del reflejo sobre vidrio y del ángulo de Brewster (de unos  $56^\circ$ ) para dar con su eje.

### 3. Discusión y Resultados

#### 3.1. Análisis y validez de la Ley de Malus

La Ley de Malus viene dada por la ecuación 1, la cual expresa la irradiancia de salida de un haz de luz linealmente polarizado tras cruzar un polarizador tal que el ángulo entre el eje del polarizador y el vector campo eléctrico forman un ángulo  $\theta$ . En ella,  $I_0$  es la irradiancia antes de entrar al polarizador (y la máxima si  $\theta$  vale  $0^\circ$  o  $180^\circ$ ). Nosotros produciremos esta luz polarizada con ayuda de nuestra fuente de luz no polarizada y un polarizador.

Una vez, tomados los datos, los representamos gráficamente.

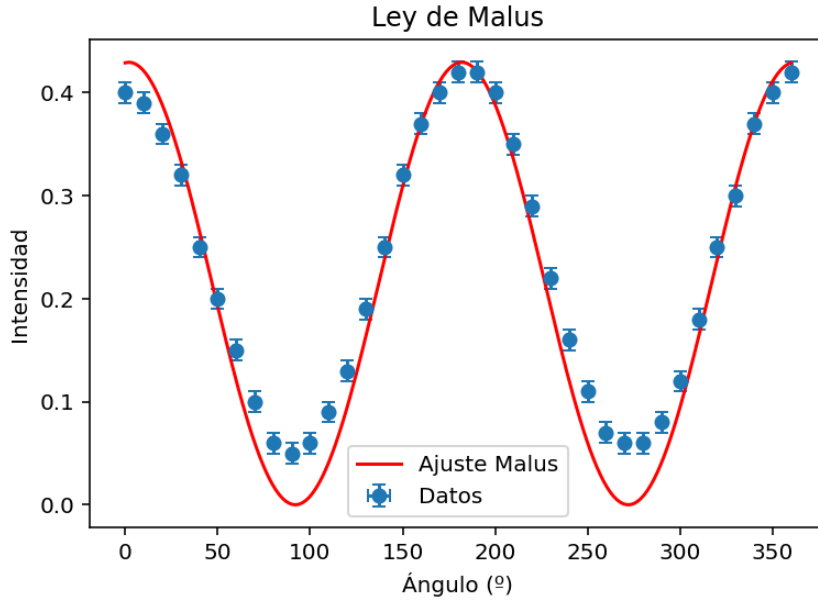


Figura 3: Ley de Malus. Gráfica de  $I(\theta)$  frente a  $\theta$  para polarización lineal.

La gráfica muestra claramente la oscilación entre el máximo de Intensidad y la Intensidad nula, teórica, pues en ciertos ángulos, según la Ley de Malus, debería no pasar luz. Aquí, sin embargo, observamos que estos mínimos no son nulos ya que experimentalmente, rara vez se halla la oscuridad total al ser los polarizadores comerciales no perfectos y al haber ligera contaminación lumínica externa en el banco de estudio. Vemos también, que los polarizadores están bastante bien alineados pues los máximos ocurren en  $0^\circ$ ,  $180^\circ$  y  $360^\circ$  y los mínimos en  $90^\circ$  y  $270^\circ$ , tal y como prevé la expresión 1. Aunque con el ajuste, observamos que realmente la imprecisión del ángulo es más bien  $\theta = 0,04 \pm 0,02$  rad, muy cercana a 0.

El ajuste puede no parecer muy bueno ya que no están todos los puntos contenidos; esto se debe a que se ajusta la Ley de Malus a los datos experimentales y, mientras que los mínimos teóricos han de ser nulos, los experimentales no lo son. Aún así, el ajuste lo hacemos para obtener  $I_0$ , es decir, la Intensidad máxima. Esta si se puede obtener en este ajuste con seguridad y es:

$$I_0 = 0,43 \pm 0,01 \text{ W/m}^2$$

Presentamos otro tipo de representación, esta vez un ajuste lineal para comparar con el ajuste no lineal recién comparado:

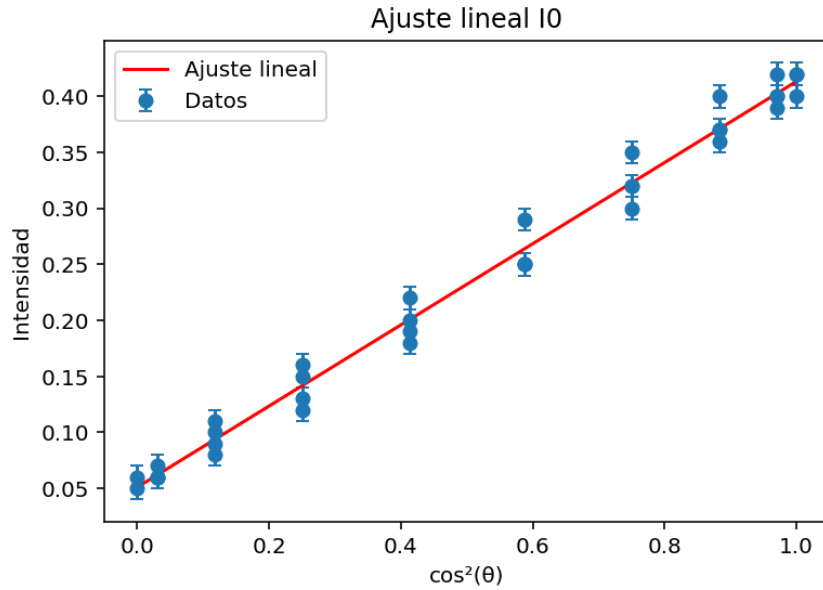


Figura 4: Ajuste lineal  $I_0$ . Gráfica de  $I(\theta)$  frente a  $\cos^2(\theta)$  para polarización lineal.

Se ve un ajuste muy bueno a esta recta, con una constante de correlación de  $r = 0,99456$ , el resultado obtenido de la pendiente de la recta en este ajuste es  $I_0 = 0,36 \pm 0,01 \text{ W/m}^2$ . Vemos que aunque el ajuste es bueno, el valor de intensidad máxima difiere del ajuste anterior; esto es porque aquí hemos tomado el ajuste a  $y = mx + n$  cuando el ajuste real para la Ley de Malus debería ser sin término independiente (y este nos da por impureza de los polarizadores y/o contaminación lumínica). El ajuste que se ajusta realmente a  $\frac{I}{\cos^2(\theta)} = I_0$  se ve a continuación:

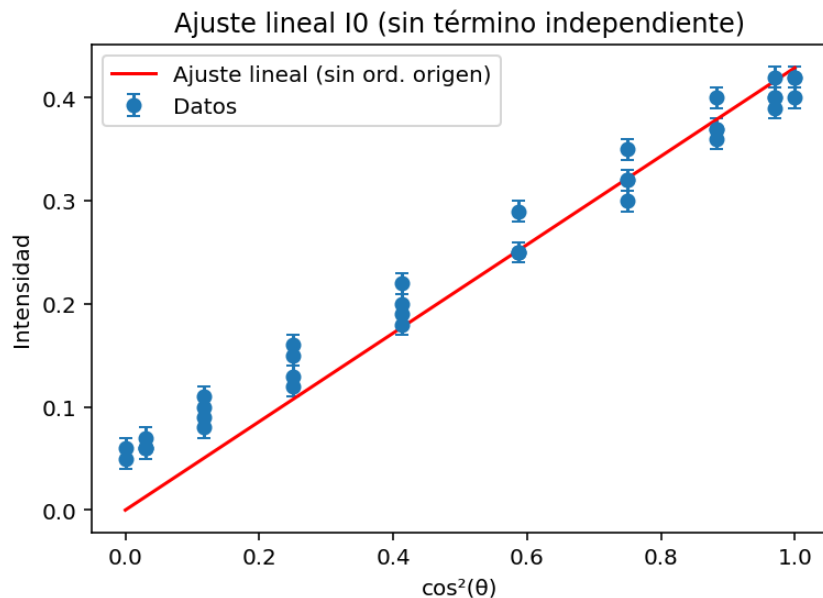


Figura 5: Ajuste lineal  $I_0$  sin término independiente. Gráfica de  $I(\theta)$  frente a  $\cos^2(\theta)$  para polarización lineal.

Este caso se ajusta a la realidad sin tener en cuenta los defectos de los polarizadores y

la contaminación, el ajuste es el mismo y el resultado es:

$$I_0 = 0,43 \pm 0,01 \text{ W/m}^2$$

Que es el mismo resultado al ajuste no lineal anterior, tal y como debería ser.

Podemos añadir a mayores que esa diferencia de  $0,07 \text{ W/m}^2$  corresponde a estos factores externos; se observa bien en la Figura 3, porque es la altura de los mínimos, por ello en la recta ello resulta en el término independiente, la ordenada respecto al origen.

### 3.2. Generación y análisis de Luz Circular y Elípticamente Polarizada

Entre los dos polarizadores colocamos la lámina retardadora de cuarto de onda, esta, si sus ejes (ya determinados, explicado con anterioridad) están inclinados respecto a los del polarizador, generan un desfase de  $90^\circ$  entre las componentes que cruzan su eje rápido y su eje lento. Por ello, si la lámina está inclinada  $45^\circ$ , la luz se divide en partes exactamente iguales ya que  $\cos(\frac{\pi}{4}) = \sin(\frac{\pi}{4})$ , resultando en polarización circular que analizaremos al igual que antes, con el analizador y la intensidad que llega al receptor. Si la inclinación de la lámina fuera otro ángulo, como los  $30^\circ$  que inclinaremos, la descomposición es desigual, siendo mayor en uno de sus ejes que en el otro, daría lugar así, a polarización elíptica, que también analizaremos.

Observamos la representación gráfica de la intensidad según la inclinación del analizador respecto al primer polarizador:

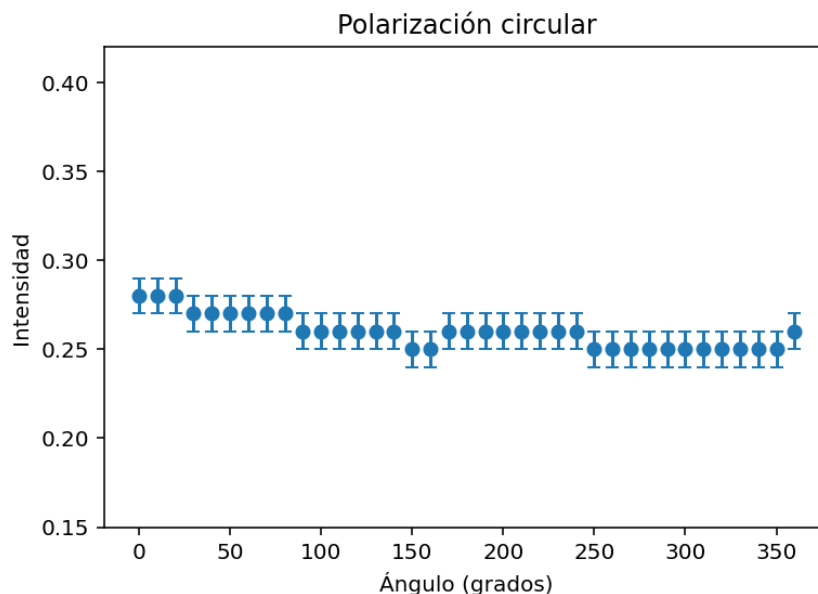


Figura 6: Gráfica de  $I(\theta)$  frente a  $\cos^2(\theta)$  para polarización circular.

Se observa un valor prácticamente constante de Intensidad en función del ángulo. Esto es así debido a que el analizador sólo deja pasar las componentes paralelas al eje de polarización, como la entrada es de polarización distribuida en todas las direcciones (circular), solamente pasa la mitad de la intensidad que había. La media de estos valores nos

da  $I = 0,26 \pm 0,01 \text{ W/m}^2$ , por lo que la intensidad inicial nos daría:  $I = 0,52 \pm 0,01 \text{ W/m}^2$ . Este resultado parece diferir de los presentados en los métodos anteriores, sin embargo, si tenemos en cuenta el error dado por contaminación lumínica ambiental o la naturaleza de nuestros polarizadores comerciales, que antes nos daba ese valor residual de unos  $0,07 \text{ W/m}^2$ , podríamos corregir este valor subido en intensidad por esta contaminación y al restarle ello tendríamos:

$$I = 0,45 \pm 0,01 \text{ W/m}^2$$

Que resulta mucho más parecido y coherente con nuestros resultados previos.

La representación de de  $I(\theta)$  para polarización elíptica se muestra a continuación:

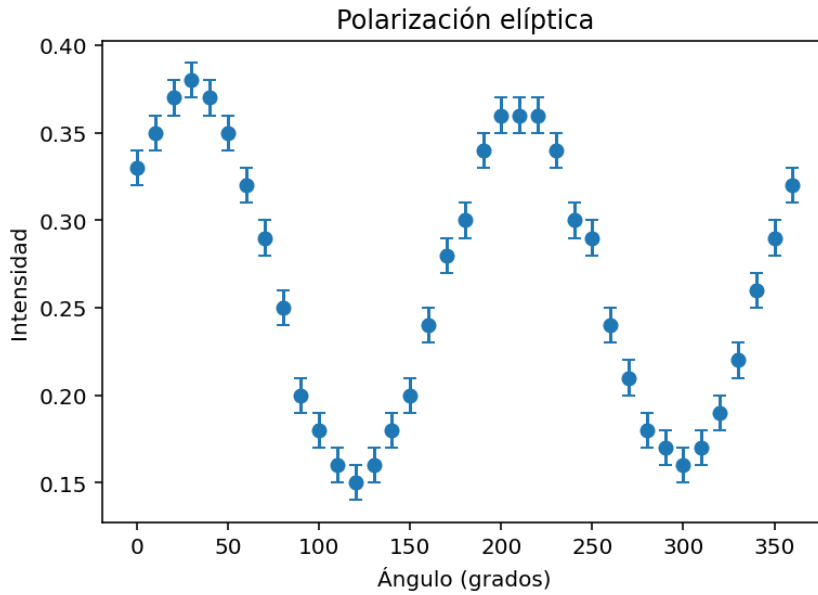


Figura 7: Gráfica de  $I(\theta)$  frente a  $\cos^2(\theta)$  para polarización elíptica.

En la polarización elíptica, los mínimos no llegan a ser cero, y se puede sacar mucha información de esta gráfica. Primero, se sabe que sus intensidades no son nunca nulas (ni teórica ni experimentalmente, aún aplicando corrección por contaminación), lo que reafirma el análisis de la polarización elíptica. También, sabemos que el eje mayor, dado por el eje rápido de la lámina retardadora, se encuentra en  $30^\circ$  (y  $210^\circ$ ) y el eje menor, el eje lento de la lámina, a  $120^\circ$  (y  $300^\circ$ ). Algo que no debería darse, sin embargo, es que un máximo sea mayor que el otro y un mínimo menor que su hermano, aunque entran en su margen de error, en este tipo de polarización no se debería dar. También, se deduce que la lámina está inclinada  $30^\circ$  al encontrarse el primer máximo en dicho ángulo.

Para saber  $I_0$  en este caso, usaríamos  $I_0 = I_{max} + I_{min}$  que corregiremos con nuestra corrección por contaminación a  $I_0 = I_{max} + I_{min} - I_{residual}$ , donde  $I_{residual} = 0,07 \text{ W/m}^2$ . Así, obtenemos que:

$$I_0 = 0,46 \pm 0,01 \text{ W/m}^2$$

Similar a los valores obtenidos de  $I_0$  en momentos previos.

### 3.3. Ángulo Brewster y Orientación de los ejes Polarizadores

Dado por la ecuación 2, el ángulo de Brewster nos resulta extremadamente útil para descubrir el eje de un polarizador lineal, aunque en esta práctica se haga de forma cualitativa. Para conocer los ejes relativos, nos basta con colocar dos polarizadores y girarlos de forma que no pase luz, ahí estarán formando  $90^\circ$  sus ejes. Pero para conocer el real, con usar un reflejo en una superficie situada en el ángulo de Brewster correspondiente, nos llega. Por ejemplo, situándonos a unos  $56^\circ$  dirección a un vidrio, si colocamos el polarizador de manera que se vea el brillo reflejado con intensidad máxima, la dirección del polarizador paralela al plano de la superficie del vidrio será el eje del polarizador. Sin embargo, si lo giráramos hasta no ver nada de ese brillo, el eje del polarizador sería paralelo al plano incidente-reflejado del rayo.

En las siguientes dos imágenes se observa la representación ilustrativa de las consecuencias del ángulo de Brewster sobre la polarización de la luz y un ejemplo real de lo que visualizaríamos con ayuda de un polarizador en el ángulo de Brewster.

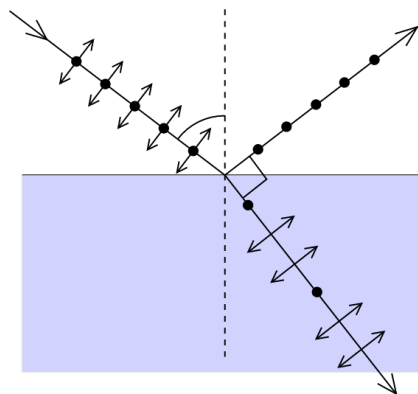


Figura 8: Ilustración esquemática del ángulo de Brewster.



Figura 9: Fenómeno de reducción de brillos con ayuda de un polarizador.

## 4. Conclusiones

En las secciones dedicadas al estudio y análisis de la Ley de Malus, la luz polarizada elíptica y circularmente, obtuvimos distintos valores de  $I_0$ , haciendo la media de todos

ellos, obtendríamos que:

$$I_0 = 0,44 \pm 0,01 \text{ W/m}^2$$

A mayores, verificamos la Ley de Malus adecuada a un sistema con cierta contaminación lumínica, dándole así validez a la hora de representar fenómenos físico-ópticos.

A su vez, hemos hecho uso de nuestros conocimientos en óptica para resolver pequeños problemas de ajuste como conocer los ejes de los filtros polarizadores y conocer los ejes de la lámina retardadora de cuarto de onda.