

# Polarización lineal de la luz.

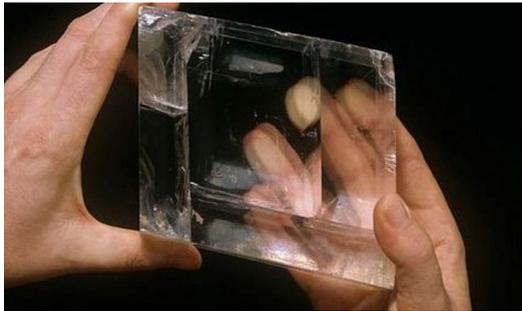
## Objetivos.

El objetivo general de este de este laboratorio es comprender la polarización de la luz para ellos se utilizarán filtros polarizadores lineales.. En este trabajo la luz es tratada en su naturaleza ondulatoria (onda electromagnética).

Objetivos específicos:

- Polarizar linealmente la luz proveniente de distintas fuentes (lámparas incandescentes, leds, láseres) con distintos materiales. Comprobar la *Ley de Malus*. Esta describe la intensidad de luz luego de atravesar dos polarizadores lineales, del tipo Polaroid, donde uno se mantiene fijo y el otro puede rotar 360° grados.
- Observar el estrés mecánico en materiales translúcidos: Se utilizará la *Fotoelasticidad*, que es una técnica experimental que permite medir esfuerzos y deformaciones. Esta medición evalúa el cambio de índice de refracción de un material al ser sometido a una esfuerzo mecánico.

## Marco Teórico.



Polarización de la luz: Históricamente este fenómeno se atribuyó al descubrimiento hecho por un marinero que regresó a Copenhague (Dinamarca) desde Islandia, trayendo consigo hermosos cristales que ahora conocemos como calcita (Ver figura 1).

Estos cristales fueron estudiados por Erasmus Bartholin, un médico danés, matemático, y físico (1669). Él observó que las imágenes formadas a través de estos cristales eran dobles. Además, al girar el cristal, una imagen permaneció en su lugar

mientras que la segunda giró con el cristal. Ese fenómeno es conocido como *birrefringencia*, o *doble refracción*, generalmente se presenta en la calcita y en algunos plásticos sometidos a tensión como el celofán. Estos materiales son isótropos (sus propiedades no dependen de la dirección en la cual son medidas). La luz incidente se separa en dos rayos llamados ordinario y extraordinario. Estos rayos están polarizados en direcciones perpendiculares, en general el rayo ordinario sigue la *Ley de Snell*<sup>(1)</sup> y el otro no.

Varios científicos estudiaron este fenómeno por ejemplo Christiaan Huygens, que explicó la doble refracción con la idea de frentes de onda propagándose. Formuló la hipótesis de que la luz es una onda longitudinal, es decir que ondula en la dirección de su desplazamiento a semejanza de las ondas sonoras.

En general, la mayor parte del debate científico sobre la óptica durante el siglo XVIII estaba centrado entre las teorías corpusculares y ondulatorias, pero la doble refracción seguía siendo un problema importante sobre el cual no se tenía un consenso. En ese momento no existía una explicación concluyente acerca de este fenómeno. Sin embargo, George Gabriel Stokes, Profesor de Matemáticas en la Universidad de Cambridge, estableció un formalismo matemático para describir el estado de polarización de cualquier haz de luz. Este formalismo describiría el fenómeno presente en los cristales de calcita y que tanto intrigó a Huygens. y que posteriormente pudo ser formalizado.

La polarización es una propiedad de la luz, y en consecuencia una propiedad fundamental de la radiación electromagnética. Ella provee información acerca del campo

magnético/eléctrico, que permite describir las características internas de una fuente de radiación.

Algunos conceptos descritos en la física electromagnética como el campo magnético, el campo eléctrico, las ecuaciones de Maxwell y las ondas electromagnéticas son importantes para explicar el fenómeno.

(1) La Ley de Snell fue presentada en el TP: "Fenómenos de reflexión y refracción en una interfaz"

#### - Ondas Electromagnéticas.

Las ondas electromagnéticas, como su propio nombre indica, están compuestas por dos magnitudes físicas: un campo eléctrico y otro magnético, que se propagan de forma coordinada. En este trabajo, nos referiremos sólo al campo eléctrico, ya que conocido éste y a partir de las ecuaciones de Maxwell<sup>(2)</sup> se puede obtener el campo magnético. Podemos representarlo de una forma simplificada mediante las ecuaciones:

$$\begin{aligned} - E_x(t) &= E_x(t)\cos(\omega t - \varphi_1) \\ - E_y(t) &= E_y(t)\cos(\omega t - \varphi_2) \end{aligned}$$

donde  $\varphi_1$  y  $\varphi_2$  describen dos ángulos de fase arbitrarios.

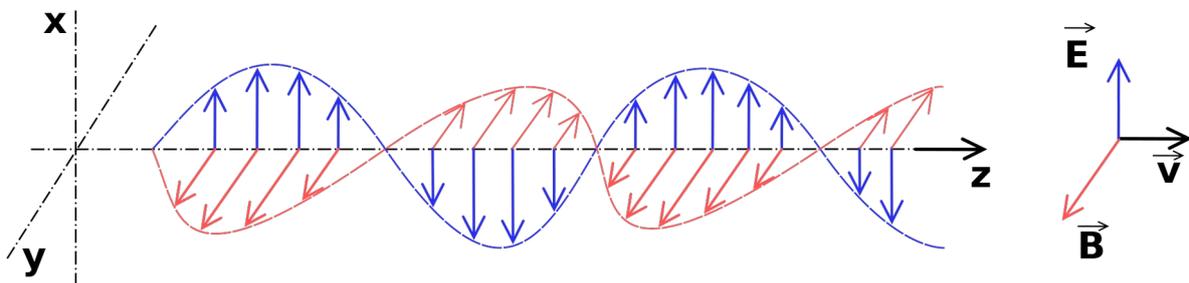


Figura 2. Propagación de una onda electromagnética.

Una de las características que tienen las ondas electromagnéticas, es que no necesitan un medio para propagarse. Además, se caracterizan porque en el vacío se propagan a la velocidad de la luz,  $c$ . Si clasificamos las ondas electromagnéticas en función de su longitud de onda (o frecuencia), obtenemos lo que se conoce como espectro electromagnético. La luz visible es la parte del espectro electromagnético a la que es sensible el ojo humano, aproximadamente de 400 a 700 [nm].

#### - Polarización.

Polarización generalmente significa "orientación", viene de la palabra griega "Polos". Este término es utilizado para describir cómo la luz o alguna otra radiación electromagnética están restringidas a una dirección de propagación. Si una onda electromagnética no tiene orientación preferencial se dice que no está polarizada; pero si existe una dirección preferencial se dice que está polarizada.

Existen diferentes tipos de polarización: la polarización elíptica, lineal y circular. Estos estados de polarización pueden ser descritos usando la fase  $\varphi$  de la onda electromagnética. La polarización elíptica es el caso más general y ocurre cuando  $\varphi \neq 0$ , así el vector campo eléctrico describe una elipse en el plano perpendicular a la dirección de propagación (Ver figura 3). Se dice que una onda está linealmente polarizada si las componentes "x" e "y" del campo eléctrico están en fase  $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$  o en oposición de fase  $\varphi = \pi$ ; así el campo eléctrico describe una recta en el plano.

Para el caso específico  $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$  las componentes del campo eléctrico  $E$  son:

$$\begin{aligned} - E_x(t) &= E_x(0)\cos(\omega t) \\ - E_y(t) &= E_y(0)\cos(\omega t) \end{aligned}$$

Así la orientación de  $E$  depende solo de la magnitud de  $E_x(0)$  y  $E_y(0)$  que son dependientes del tiempo.

En el caso que la fase cambie  $\varphi_1 = \varphi_2 \pm \pi/2$ , el vector campo eléctrico se mueve circularmente con una frecuencia angular  $\omega$ , la radiación es circularmente polarizada

(2) Las ecuaciones de Maxwell son la base del electromagnetismo. Relacionan la evolución de los campos eléctrico y magnético con las propiedades de los medios materiales.

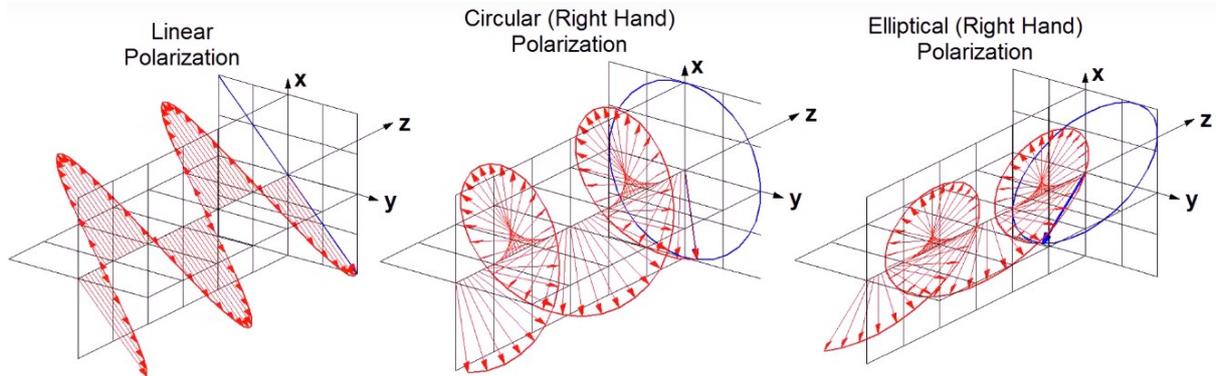


Figura 3. Tipos de polarización.

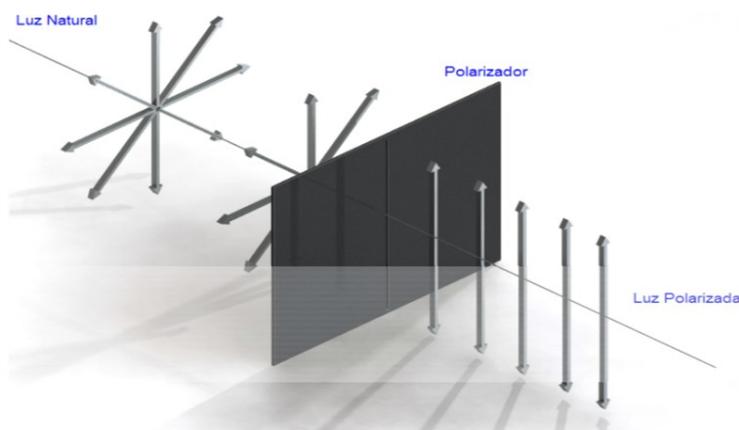
### - Dicroísmo

El polarizador dicroico es en sí mismo físicamente anisótropo, produciendo una fuerte asimetría o absorción preferencial de una componente del campo  $E$  ( $E_x()$  o  $E_y()$ ), mientras que es esencialmente transparente para la otra. Entonces, los materiales dicroicos son capaces de cambiar los estados de polarización de un rayo de luz; de esta forma, cuando la luz viaja a través de estos medios dicroicos experimenta una absorción variable en función de su plano de polarización.



Existen ciertos materiales que presentan dicroísmo en sus respectivas estructuras cristalinas, el más conocido de estos de estos minerales probablemente sea la turmalina, una piedra semipreciosa a menudo usada en joyería. Para este mineral hay una dirección específica dentro del cristal que se conoce como eje principal u óptico que está determinado por su configuración atómica. La componente del campo eléctrico de una onda de luz incidente que es perpendicular al eje principal es fuertemente absorbida por la muestra y toma un color negro. Pero la utilidad de la turmalina está muy limitada por el hecho también la luz transmitida (paralela al eje principal) sufre cierta absorción tomando un color verde (de aquí el término dicroico que significa dos colores).

### - Polaroid



En 1928 Edwin Herbert Land, entonces estudiante universitario del Harvard College, inventó el primer polarizador de hoja dicroica conocido comercialmente con el nombre de hoja polaroid. Fue el primer filtro polarizador sintético. Tras varios años de desarrollo, en 1932 fundaría los laboratorios Land-Wheelwright, que en 1935 adoptarían la denominación actual de Polaroid.

Los filtros Polaroid son conocidos como polarizadores lineales

dicroicos, estos son compuestos por capas de polímeros orgánicos. En 1937, Edwin Land estableció Polaroid Corporation en Cambridge Massachusetts, la compañía produjo inicialmente *Polaroid Day Glasses*, las primera gafas de sol con un filtro polarizador.

Es sin duda, el grupo de polarizadores más ampliamente usados, como por ejemplo en gafas de sol, filtros polarizadores para lentes de cámaras fotográficas, en procesos ópticos y fotónicos, entre otros. Este tipo de polarizadores son un producto industrial basados en los filtros del tipo rejilla de alambre, tomando como base el comportamiento de los cristales dicroicos estudiados en la sección anterior. Los polaroid no contienen cristales dicroicos, siendo por el contrario, un análogo molecular de la rejilla de alambre. Una hoja compuesta de moléculas de hidrocarburos transparentes se calienta y se estira en una dirección dada quedando alineadas sus moléculas. Consideremos a la luz del sol (luz no polarizada o natural) como una onda incidente, la componente de  $E$  de esta onda que es paralela a las moléculas, impulsa los electrones actuando sobre ellos, siendo fuertemente absorbida. El eje de transmisión del polarizador, es por consiguiente, perpendicular a la dirección en la cual se estiró la película. Cada una de estas cadenas separadas molecularmente se les denomina entidades dicroicas, por simular un comportamiento cualitativo del mecanismo que da lugar al dicroismo cristalino.

#### - Ley de Malus.

Recordemos que la luz natural puede ser emitida por cualquier fuente luminosa y en general, la luz emitida es una mezcla aleatoria de ondas linealmente polarizadas en todas las direcciones transversales posibles, esta luz se llama luz no polarizada. Para crear luz polarizada a partir de luz no polarizada se requiere un filtro análogo a la ranura para ondas electromagnéticas como el presentado en la figura 5 y explicado en la sección anterior. Siguiendo esta idea, solamente podrán atravesar el polarizador aquellas ondas que sean paralelas al eje de transmisión, el resto de componentes es fuertemente absorbida por el filtro, provocando una disminución en la potencia de luz transmitida, pero ahora polarizada linealmente (las ondas vibran en una sola dirección).

Ahora, supongamos que introducimos un segundo polarizador idéntico al primero (también llamado analizador), cuyo eje de transmisión es paralelo al primer polarizador, Si la amplitud del campo eléctrico transmitido por el primer polarizador es  $E_0$ , solamente su componente  $E_0 \cos(\theta)$  paralela al eje de transmisión del analizador podrá ser detectada por un sensor (fotodiodo o fototransistor), ver figura 6. Recordemos que estamos tratando con ondas pero debido a la frecuencia tan elevada de la luz, nuestro detector medirá solo la irradiancia incidente.

De acuerdo a la siguiente ecuación, la irradiancia que llega al detector está dada por:

$$I(\theta) = I(0) \cos^2(\theta) \quad \text{Ley de Malus}$$

La irradiancia máxima  $I_{max}$  ocurre cuando el ángulo  $\theta$  entre los ejes de transmisión del analizador y el polarizador  $\theta=0$ , entonces  $I_{max} = I(0)$ . Por el contrario, cuando los ejes de transmisión de ambos polarizados forman un ángulo  $\theta=90$ , se dice que los ejes están cruzados y la irradiancia es mínima o nula,  $I_{min} = I(90) = 0$ .

Esto se conoce como *Ley de Malus* que se publicó por primera vez en 1809 por Étienne Malus, un ingeniero militar y capitán en el ejército de Napoleón.

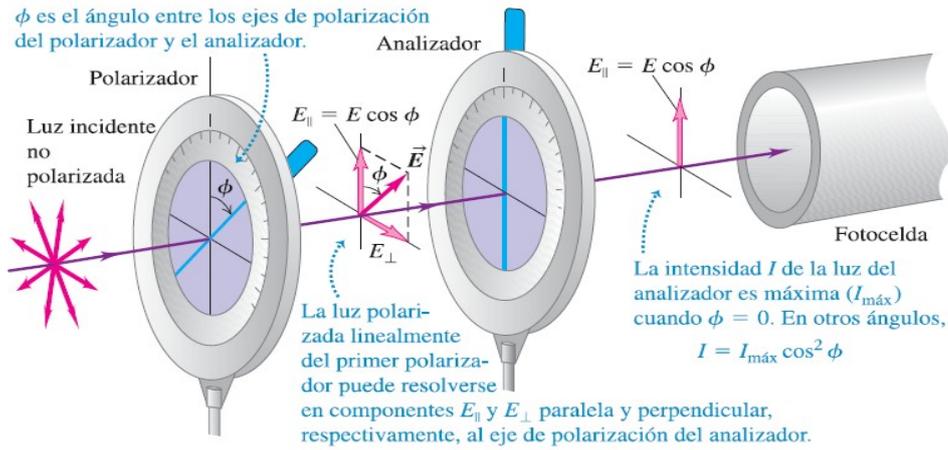


Figura 6. Polarización lineal de luz a partir de luz no polarizada. La Ley de Malus, sólo se aplica si la luz incidente que pasa a través del analizador, está linealmente polarizada.

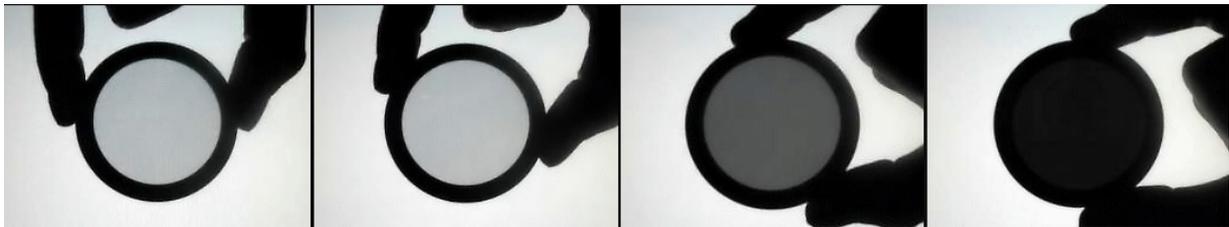


Figura 7. Filtro Polaroid frente a un monitor LCD, el eje de transmisión del filtro es horizontal. Cuando el Polaroid se encuentra perpendicular, la luz se bloquea, esto se debe a que las pantallas LCD emiten luz polarizada, en este caso la luz LED está polarizada horizontalmente, la luz logra atravesar el filtro cuando este se encuentra en posición horizontal.

#### - Fotoelasticidad.

Es una técnica experimental para la medición de esfuerzos y deformaciones. Se basa en el uso de luz para dibujar figuras sobre piezas de materiales isótropos, transparentes y continuos, que al ser sometidos a esfuerzos, generan un cambio en el índice de refracción proporcional al esfuerzo, para lograr apreciar estos cambios es necesario colocar estas piezas entre dos polarizadores del tipo *Polaroid*. Es en este fenómeno en el que se fundamenta la fotoelasticidad. La fotoelasticidad fue desarrollada a principios del siglo XX. El primer trabajo fue de E. Coker y de L. Filon en la universidad de Londres, y permitió a la fotoelasticidad convertirse rápidamente en una técnica viable para el análisis cualitativo de los esfuerzos. Se le encontró una gran aplicación en la industria, en dos dimensiones rebasó al resto de las técnicas en confiabilidad, alcance y factibilidad. Ningún otro método tenía la misma precisión visual y cobertura de los patrones de esfuerzo.

En la sección de experimentos, se tratará explicará detalladamente cómo reproducir esta experiencia.

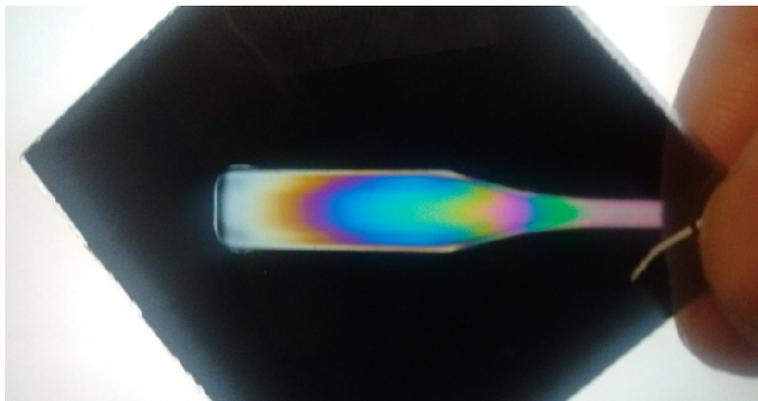


Figura 8. Un revolvedor de café, un material translúcido en dónde se puede observar mediante el uso de una pantalla LED (luz polarizada) y un polarizador, las tensiones mecánicas generadas en el proceso de fabricación. (Experiencia realizada en laboratorio de Fotónica Integrada del CIOp)

## Materiales.

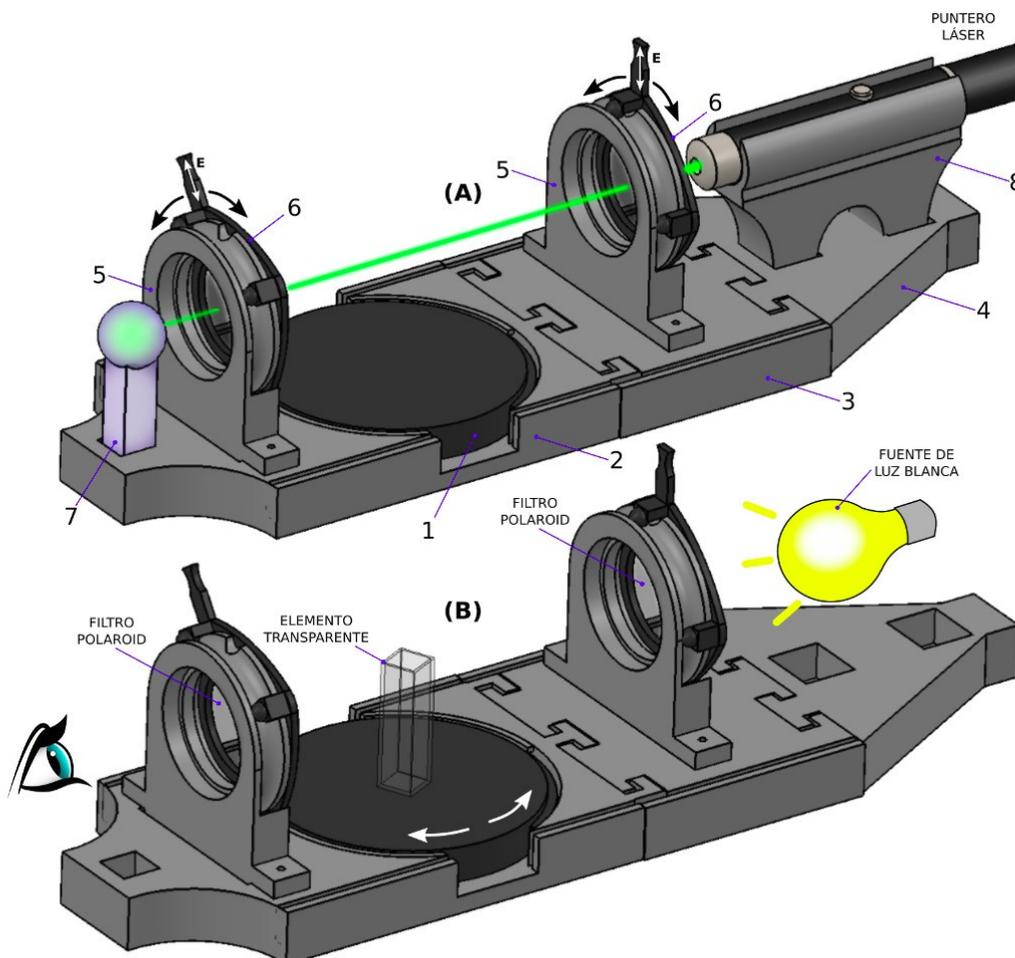
En este ítem podemos enumerar algunos dispositivos diseñados e implementados con una impresora 3D y otros comerciales.

- Puntero láser de longitud de onda 532 nm (verde) o 635 nm (rojo), y potencia de salida 50 mW (dispositivo comercial).
- 2 láminas polarizadas polaroid (dispositivo comercial).
- Dispositivo impreso en 3D, que permite variar la potencia de un láser mediante dos polarizadores, haciendo girar un polarizador respecto del otro (*Ley de Malus*).
- Un celular que tenga linterna y luxómetro (la mayoría de celulares vienen con estos elementos).

## Procedimientos.

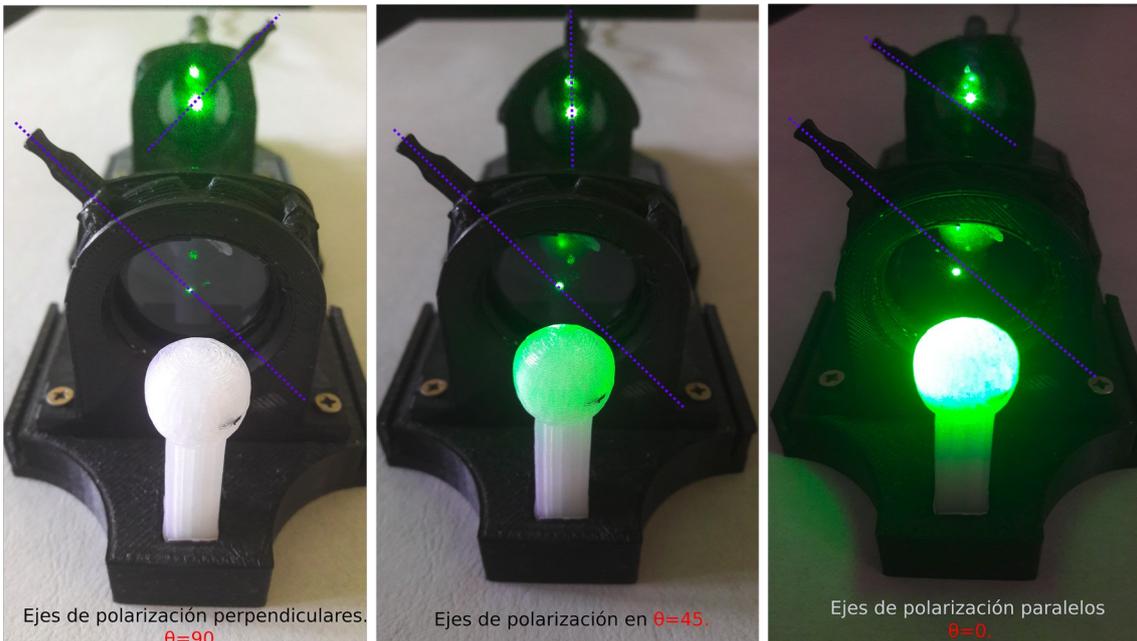
Para este trabajo práctico realizaremos dos experiencias. La figura que se muestra a continuación, indica cómo se debe disponer el dispositivo para realizar ambas experiencias, para **polarización** la imagen **A**, para **fotoelasticidad** la imagen **B**.

Recomendamos realizar ambas experiencias con muy poca luz ambiente para mejores resultados.



## A. Polarización lineal de la luz.

- Colocar el láser como lo indica la figura A y encender el láser, dejarlo prendido un tiempo prudente (1 minuto o más) hasta que la potencia se estabilice.
- Alinear los ejes de los polarizadores. Para esto se debe girar el primer polarizador (el que se encuentra más cerca del láser) hasta que las marcas sobresalientes de las tapas se encuentren paralelas, en esa posición se debe observar la máxima intensidad transmitida. marcar esta posición, y el ángulo que forman es ambos polarizadores es 0 grados.
- Girar el primer polarizador 90 grados, o hasta que las marcas sobresalientes de las tapas se encuentren perpendiculares, en esta posición se debe observar la mínima intensidad transmitida, marcar esa posición. Hasta aquí, tenemos los puntos de máxima y mínima intensidad.
- En el caso de que no se disponga de filamento transparente, se muestra en la siguiente imagen, la variación de la intensidad láser al ir rotando la posición del primer polarizador y se resume los ítems anteriores.



Realizar la siguiente tareas:

- Graficar por medio de algún programa: matlab, mathematica, (online <https://www.wolframalpha.com/>) la función  $I(\theta)=I(0)\cos(\theta)^2$  (Ley de Malus), a  $I(0)$  (valor máximo) le pueden dar el valor 1.  
Observando esta curva ¿Por qué es lo mismo trabajar en el primer cuadrante (0 a 90 grados) que en el resto de los 3 cuadrantes restantes?
- Descargar alguna aplicación de luxómetro desde la Playstore a su celular, existen varias aplicaciones gratuitas, podemos recomendar: Luxómetro, Smart Luxmeter.
- Retirar la pieza 3D translúcida del dispositivo, y alinear la salida de luz láser de manera ahora choque contra el luxómetro del celular (Tener paciencia). El luxómetro de los celulares se encuentran en general, en la zona superior de la pantalla del celular.  
NOTA: Recomendamos hacer esta alineación sobre una mesa firme, y en lo posible al dispositivo pegarlo a esta mesa, debido a que un mínimo movimiento puede desalinear el láser del sensor de luz (luxómetro).
- Con la aplicación, medir la luz láser con los ejes de los polarizadores paralelos (0 grados), luego moverse unas 3 o 4 veces (y guardar mediciones) hasta que los ejes de

los polarizadores sean perpendiculares (90 grados) y guardar el valor. Este último punto lo vamos a tomar como nuestro 0 en valores de intensidad, esto se debe a que los polarizadores no son ideales, en consecuencia la luz no es bloqueada completamente y en consecuencia el luxómetro nos va a seguir marcando un valor

- Con los puntos obtenidos, graficarla y compararla con la ley de Malus. ¿De los puntos obtenidos, que valor corresponde a  $I(0)$ ?

## B. Fotoelasticidad.

- Disponer el dispositivo como en la Figura B.
- Tener en mano varios objetos translúcidos con las dimensiones ya especificadas y además cinta scotch.
- Encender la linterna del celular y posicionarla como en la figura B.

Realizar las siguientes tareas:

- Disponer los polarizadores de manera que sus ejes de polarización queden cruzados.
- Poner varios objetos transparentes en medio de ambos polarizadores, y observar el fenómeno de fotoelasticidad. Pueden ir girando el plato giratorio con los dedos. Van a observar lo siguiente.



¿A qué se deben los colores vistos en el cubo transparente?

¿Se podría observar este fenómeno con un solo polarizador? Si/No, ¿Por qué?

- Tomen un pedazo de cinta scotch, y estirarlo mientras observan el fenómeno a través del segundo polarizador. Explicar lo observado teniendo en cuenta el índice de refracción.