

## Los reflejos de la luz

### INTRODUCCIÓN

Una de las características más importantes de las ondas luminosas es que son transversales. Es decir, la propiedad del medio que las ondas propagan oscila en un plano perpendicular a la dirección de propagación. Es el caso de las ondas de agua (el agua sube y baja perpendicularmente a la propagación de la ola), pero no es el caso de las ondas sonoras (la compresión y depresión del aire se realiza en la dirección en que se propaga el sonido). Éstas últimas, llamadas longitudinales, poseen una sola dirección de vibración posible, la de propagación, pero las ondas transversales tienen una infinidad de direcciones de vibración en el plano perpendicular a ella. Cuando la vibración se efectúa en una sola dirección del mencionado plano se dice que la onda está linealmente polarizada.

La primera gran teoría ondulatoria sobre la naturaleza de la luz, la que el físico, matemático y astrónomo holandés CHRISTIAN HUYGENS (1629-1695) enunció en 1690, suponía que las ondas luminosas eran como las sonoras: longitudinales. Esto hizo que no se pudiera interpretar correctamente el fenómeno de la polarización de la luz, que él mismo había descubierto al observar la doble refracción en el espato de Islandia a través de una lámina de turmalina. El fenómeno que constató fue el siguiente: si se hace girar la lámina de turmalina en un plano perpendicular a la dirección de observación, el rayo ordinario desaparece para un determinado ángulo de giro, quedando solo el extraordinario, pero si se sigue girando reaparece el rayo ordinario y desaparece el extraordinario. Esto es lo que muestran las fotografías de la Figura 1, que han sido obtenidas con un filtro polarizador.

### LUZ NATURAL Y POLARIZACIÓN

Poco más de un siglo después, en 1810, ETIENNE-LOUIS MALUS (1775-1812) descubrió un fenómeno aná-

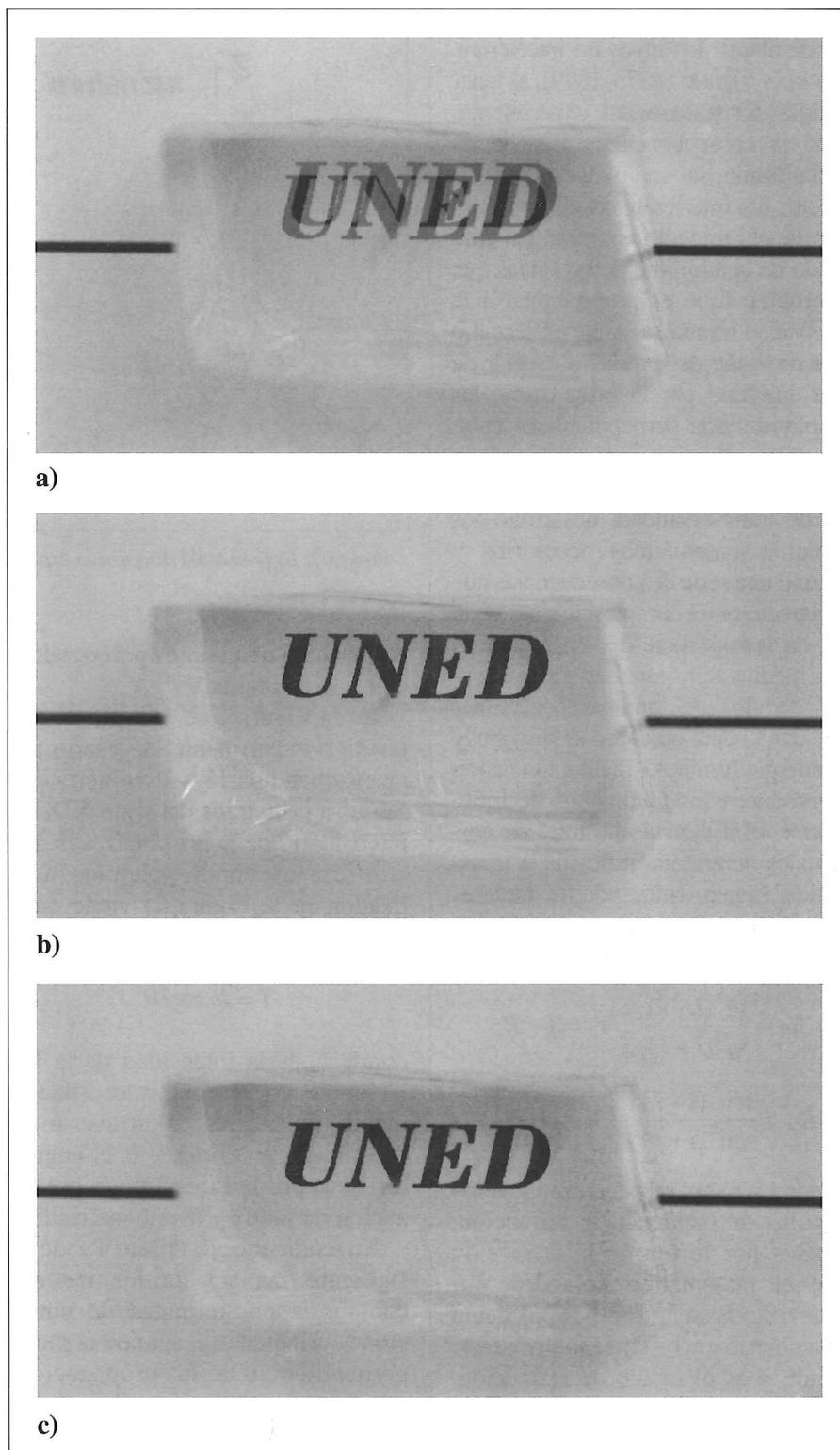


Figura 1. Doble refracción en el espato de Islandia: a) obtenida sin filtro polaroide; b) obtenida con filtro polaroide en una dirección (se elimina una imagen); c) obtenida con filtro polaroide en la dirección perpendicular a la de b) (se elimina la otra imagen).

logo examinando el reflejo de la luz del Sol en el cristal de una ventana: para cierto ángulo de incidencia, haciendo girar la lámina de turmalina se hacía desaparecer totalmente el reflejo. La luz reflejada en el vidrio de la ventana estaba polarizada.

Estos hechos, inexplicables en la época, fueron interpretados correctamente tras el experimento que DOMINIQUE FRANÇOIS JEAN ARAGO (1786-1853) y AUGUSTIN JEAN FRESNEL (1788-1827) realizaron en 1816, tratando de hacer interferir dos rayos

de luz polarizados en direcciones perpendiculares: los rayos no interferían. THOMAS YOUNG (1773-1829), al tener noticia del fracaso del experimento, sacó la consecuencia adecuada: las ondas luminosas son transversales. En efecto: las interferencias se observan porque el promedio temporal del cuadrado de la amplitud de las ondas que interfieren (que es proporcional a la intensidad luminosa) tiene un término que proviene del producto escalar de una amplitud por la otra. Como las amplitudes son perpendiculares entre sí, dicho término interferencial es nulo. Fresnel, partiendo de esta hipótesis de transversalidad, desarrolló los cálculos matemáticos necesarios y obtuvo una serie de consecuencias que esclarecieron el comportamiento de la luz en la superficie de separación de dos medios transparentes. En particular, dedujo sus famosas ecuaciones que dan cuenta de cómo se distribuye la energía luminosa incidente cuando se producen los fenómenos de reflexión y refracción de la luz. Los porcentajes de energía reflejada y transmitida vienen dados por los factores de reflexión,  $R$ , y transmisión,  $T$ , que tienen las expresiones siguientes:

$$R_{\parallel} = \frac{\operatorname{tg}^2(i-r)}{\operatorname{tg}^2(i+r)}; \quad T_{\parallel} = 1 - R_{\parallel}$$

$$R_{\perp} = \frac{\operatorname{sen}^2(i-r)}{\operatorname{sen}^2(i+r)}; \quad T_{\perp} = 1 - R_{\perp}$$

donde  $i$  y  $r$  son, respectivamente, los ángulos de incidencia y refracción, ligados por la ley de la refracción que el matemático holandés WILLEBRORD SNELL (1580-1626) había descubierto en 1604:  $\operatorname{sen} i = n \operatorname{sen} r$ , donde  $n$  es el índice de refracción. Los símbolos ( $\parallel$ ) y ( $\perp$ ) indican la dirección en que la luz está polarizada: paralela o perpendicularmente al plano de incidencia, respectivamente.

### LA ACCIÓN DE UNA LÁMINA POLARIZADORA: COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LA TRANSVERSALIDAD DE LAS ONDAS LUMINOSAS

Antes de analizar las expresiones de Fresnel, necesitamos referirnos a

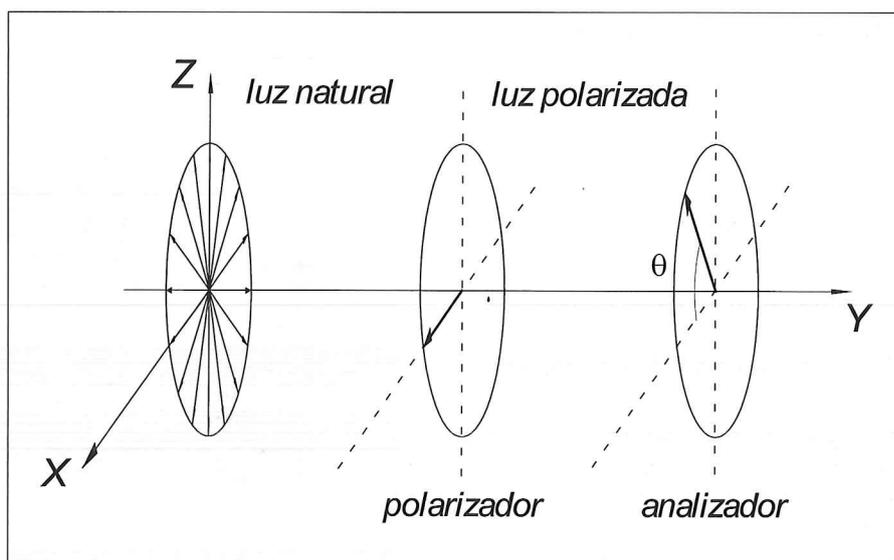


Figura 2. Esquema del dispositivo experimental para la observación de la ley de Malus.

cómo actúa una lamina polarizadora como la turmalina<sup>1</sup>.

En la Figura 2 se muestra el dispositivo experimental necesario para estudiar una ley descubierta por Malus a principios del siglo XIX: la intensidad  $I$  de la luz polarizada que atraviesa una lámina polaroide (analizador en la Figura 2) viene dada por la expresión:

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

donde  $I_0$  es la intensidad de la luz incidente en el analizador (linealmente polarizada al atravesar el polarizador anterior), y  $\theta$ , el ángulo formado por la dirección de polarización de la luz y la del analizador.

El fenómeno se desarrolla de la siguiente manera: la luz natural, compuesta por infinidad de vibraciones orientadas al azar en el plano perpendicular a la propagación, emerge del polarizador vibrando en una sola dirección (polarización lineal). La amplitud resultante de la luz polarizada es la suma de las proyecciones de todas las amplitudes sobre la dirección de polarización (indicada en la Figura 2 con una

línea de puntos sobre el polarizador). La suma, efectuada en cada instante de tiempo, da como resultado una vibración de la misma frecuencia que la de la radiación incidente. Esto se repite para todas las frecuencias por separado<sup>2</sup> y equivale a decir que la luz natural puede ser considerada como la superposición de dos vibraciones perpendiculares entre sí, de la misma amplitud máxima para cada frecuencia, y sin ninguna correlación temporal entre ellas.

Así, pues, la luz linealmente polarizada que emerge del polarizador de la Figura 2 tiene la mitad de la intensidad que la luz natural incidente. Cuando llega al analizador, la vibración se proyecta según la dirección de polarización de éste último, disminuyendo la amplitud máxima en el factor  $\cos \theta$ . Como la intensidad es proporcional al cuadrado de la amplitud máxima, se deduce inmediatamente la ley de Malus indicada más arriba.

El dispositivo de la Figura 2 se puede construir en casa utilizando láminas polaroides (fáciles de con-

<sup>1</sup> Existen en la actualidad láminas polaroide que permiten estudiar estos efectos de manera casera. Se pueden adquirir en las tiendas de fotografía (filtros polaroide) o utilizar las que se aplican a los cristales de las gafas para la nieve o para observar el cine en tres dimensiones.

<sup>2</sup> La situación es más compleja porque hay que considerar una determinada anchura en frecuencias para realizar la suma de las amplitudes. En el marco de la Física Clásica (macroscópica) se pueden considerar independientes para realizar la suma cuando la diferencia en frecuencias es mayor de 100 Hz para el ojo humano, y mayor de 100 MHz para los buenos fotodiodos.

seguir hoy en día), la luz de una lámpara corriente (o la solar, pero nunca en observación directa, sino difusa) y nuestro propio ojo como detector. Al mirar a través del sistema, si hacemos girar el analizador observamos que en una vuelta completa la luz se extingue para dos ángulos separados  $180^\circ$  entre sí. Entre medias de ellos hay un máximo de intensidad. El máximo corresponde a la dirección de polarización de la luz (ángulo  $\theta = 0$ ), y los dos mínimos, a ángulos de  $90^\circ$  a derecha y a izquierda de dicha dirección. La ley de Malus queda comprobada, al menos cualitativamente.

Con este mismo dispositivo podemos ampliar el experimento como sugería ALBERT EINSTEIN (1879-1955) hacia 1940 para demostrar que la luz tiene que ser forzosamente una onda transversal. En efecto: si en vez de hacer girar el analizador en el plano perpendicular a la dirección de propagación, lo acercamos o lo alejamos del polarizador desplazándolo en dicha dirección, las propiedades de la luz transmitida no cambian. Esto sucede cualquiera que sea el ángulo  $\theta$ . Si  $\theta = 0$ , la luz que atraviesa el analizador sigue siendo máxima para cualquier distancia de éste al polarizador. Si  $\theta = 90^\circ$ , la intensidad es mínima también para cualquier distancia. Esto, unido al experimento anterior de hacer girar el analizador en el plano perpendicular a la propagación de la luz, hace razonar a Einstein de la siguiente manera: si la luz es una onda, como parece desprenderse de los experimentos de interferencia, esta onda tiene que ser transversal, como indican los experimentos de polarización. Si desplazamos el analizador según la dirección de propagación de la luz, nada cambia en sus propiedades vibratorias. Sin embargo, cuando lo hacemos girar en el plano perpendicular, las vibraciones de la onda son afectadas de tal manera que llegan a desaparecer. Esto es una prueba evidente de que las propiedades vibratorias de la luz deben manifestarse en el plano transversal.

### EL ÁNGULO DE BREWSTER Y LA ANULACIÓN DE LOS REFLEJOS LUMINOSOS

Comprobado el carácter transversal de las ondas luminosas, vamos a realizar un experimento casero que tiene relación directa con las fórmulas de Fresnel indicadas más arriba y con el comportamiento del reflejo del Sol observado por Malus. Si analizamos las expresiones de los factores de reflexión  $R_{\parallel}$  y  $R_{\perp}$ , vemos, en primer lugar, que en ellas intervienen los dos medios entre los que se sitúa la superficie de separación. En lo concerniente al fenómeno luminoso más común, la reflexión y refracción de la luz en la "superficie del vidrio", esta superficie no puede ser considerada como perteneciente solamente a dicho material. Es la superficie límite entre el aire y el vidrio, y a la interacción de la luz con ella deben contribuir tanto uno como otro. En este caso, lo que afecta a la luz en tanto que onda electromagnética son las propiedades eléctricas de estos medios, ya que las propiedades magnéticas son idénticas en ambos<sup>3</sup>. En la ley de la refracción se aprecia esta contribución simultánea porque en ella aparece el índice de refracción, que es el cociente entre las velocidades de propagación de la luz en ambos medios (300.000 km/s para el aire y 200.000 km/s para el vidrio, aproximadamente). El fenómeno de la reflexión, sin embargo, parece independiente de las propiedades de los medios entre los que se produce, ya que el ángulo de reflexión es siempre igual al ángulo de incidencia. Las fórmulas de Fresnel vienen aquí en nuestro auxilio, ya que de ellas se deduce que, si bien la dirección de propagación en la reflexión no está afectada por las propiedades de los medios en cuestión,

el porcentaje de energía que se refleja sí lo está. En efecto: imaginemos que incidimos perpendicularmente desde el aire hacia el vidrio. En estas condiciones es fácil demostrar que los factores de reflexión  $R_{\parallel}$  y  $R_{\perp}$  son iguales. No hay más que pasar al límite para ángulo de incidencia nulo y aplicar la ley de Snell, obteniéndose la siguiente expresión:

$$R_{\parallel} = R_{\perp} = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2$$

Para el caso de aire-vidrio ( $n=1,5$ ), el porcentaje de luz reflejada es del 4%, mientras que para el caso aire-agua ( $n=1,33$ ) es del 2%. Como se ve, la cantidad de luz reflejada depende de los dos medios. Por muy pulida y limpia que esté una superficie de vidrio, siempre reflejará una parte de la luz que incide sobre ella<sup>4</sup>. En todo cambio de medio, parte de la luz incidente es reflejada. Esto sólo tiene una excepción: el ángulo de incidencia de Brewster,  $i_B$ , que también se deduce de las ecuaciones de Fresnel.

Para fijar ideas, supongamos que incidimos desde el aire hacia el vidrio. En estas condiciones, el ángulo de incidencia  $i$  puede variar entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , mientras que el ángulo de refracción  $r$  lo hace entre  $0^\circ$  y  $42^\circ$ , aproximadamente. Por lo tanto,  $(i-r)$  estará comprendido entre  $0^\circ$  y  $48^\circ$ , e  $(i+r)$ , entre  $0^\circ$  y  $132^\circ$ . En definitiva, el valor de  $R_{\perp}$  crecerá monótonamente entre  $i = 0^\circ$  e  $i = 90^\circ$ , llegando a valer la unidad para este último valor de  $i$ . Por el contrario,  $R_{\parallel}$  primeramente disminuye, alcanzando el valor nulo cuando el denominador de su expresión ( $\text{tg}^2(i+r)$ ) se hace infinito, que es cuando  $i+r = 90^\circ$ , y aumenta después hasta valer la unidad. En la Figura 3 se pueden ver las gráficas que muestran estos resultados.

<sup>3</sup> Por esta razón, la polarización de la onda luminosa viene determinada por el vector eléctrico de la luz. Naturalmente, en la época de Fresnel no se conocía la esencia electromagnética de las ondas luminosas, que fue establecida por JAMES CLERK MAXWELL (1831-1879) en la segunda mitad del siglo XIX, por lo que en los razonamientos que él hizo utilizó solamente las propiedades mecánicas generales de las ondas.

<sup>4</sup> Es de señalar que gracias a esta circunstancia podemos ver la superficie de los medios transparentes, ya que si no se reflejase nada de luz no podríamos verla. Existen procedimientos para disminuir la cantidad de luz que refleja una superficie (los cristales de las gafas o las caras de ciertos prismas), que se basan en depositar una capa delgada de material dieléctrico, de índice de refracción menor que el del vidrio (fluoruro de magnesio, por ejemplo, de índice  $n = 1,38$ ).

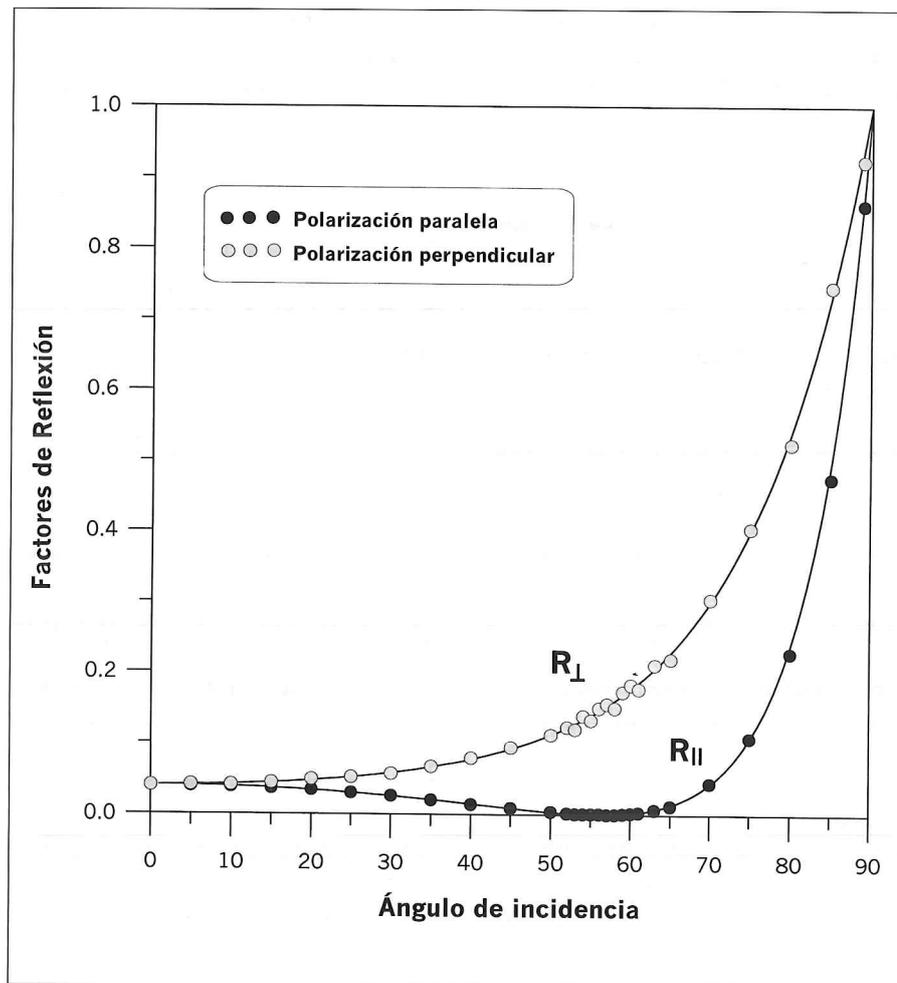


Figura 3. Factores de reflexión para la superficie aire-vidrio.

Al ángulo de incidencia para el que se anula el factor de reflexión se le denomina *ángulo de Brewster*,  $i_B$ , en honor a DAVID BREWSTER (1781-1868), que lo descubrió en el año 1815. Utilizando la ley de Snell se puede relacionar fácilmente este ángulo con el índice de refracción: como  $i_B$  y  $r_B$  son complementarios,

$$\text{sen } i_B = n \text{ sen } r_B = n \text{ cos } i_B$$

por lo que se obtiene:

$$n = \text{tg } i_B$$

y de la medida del ángulo de Brewster se puede obtener el valor del índice de refracción. Es éste uno de los métodos más precisos utilizados para tal fin.

En el caso del vidrio de ventana, cuando los rayos solares inciden bajo un ángulo  $i_B = 56^\circ$ , no se refle-

ja nada de luz polarizada paralela al plano de incidencia, pero se refleja el 15% de la luz polarizada perpendicularmente a dicho plano. Esto quiere decir que el reflejo de la luz en la ventana está polarizado totalmente en la dirección perpendicular al plano de incidencia, que en este caso suele ser un plano vertical. Si observamos este reflejo a ojo desnudo, no apreciamos en él nada de particular, porque nuestros ojos no son capaces de distinguir la luz polarizada de la luz natural. Sin embargo, si lo observamos a través de un polarizador, como hizo Malus en 1810, al hacer girar éste llega un momento en que el reflejo desaparece. Precisamente, cuando la dirección de polarización de nuestro polaroide es paralela al plano de incidencia (forma  $90^\circ$  con la dirección de polarización de la luz reflejada). Esto se puede comprobar con el siguiente experimento casero: se

coloca una vela encendida (aunque no es esencial que lo esté) encima de una mesa; en otra parte de ésta se sitúa una superficie transparente en posición vertical (un trozo de vidrio o la cara lateral de una cubeta paralelepípedica de plástico, por ejemplo) y observamos la imagen de la vela reflejada en dicha superficie. A ojo desnudo vemos simultáneamente la vela y su imagen, pero si lo miramos a través del polaroide, haciéndolo girar convenientemente nos apercebimos de que la imagen reflejada de la vela desaparece para un cierto ángulo de giro. Es lo que se aprecia en las fotografías de las Figura 4a y 4b, que han sido tomadas colocando un filtro polarizador en el objetivo de la cámara. Una de ellas corresponde al caso en que la dirección de polarización del filtro es perpendicular al plano de incidencia (se ven la vela y su imagen) y otra, con dicha polarización paralela al plano de incidencia (vela sin su imagen).

Este experimento casero sugiere una de las aplicaciones de este fenómeno: la eliminación de los reflejos en las fotografías utilizando filtros polarizadores. Otra aplicación que se hace habitualmente, y que es idéntica a la anterior, es la eliminación de los reflejos de la luz solar en la nieve mediante las gafas polarizadas. De esta manera evitamos los deslumbramientos. También se utilizan gafas polarizadas para ver el cine en tres dimensiones: en la pantalla aparecen dos imágenes ligeramente separadas y polarizadas en direcciones perpendiculares entre sí. Utilizando un polaroide distinto para cada ojo, polarizados también en direcciones perpendiculares entre sí, percibimos la imagen como si proviniera de dos perspectivas ligeramente distintas, como sucede en la vida diaria, lo que hace que el cerebro lo vea como una imagen con profundidad, proporcionando la sensación de volumen.

En definitiva: la luz, al reflejarse, muestra su condición de onda transversal; los reflejos de la luz nos ilustran sobre su naturaleza.



a)



b)

Figura 4. a) Fotografía tomada con la dirección de polarización del filtro polarizador horizontal (perpendicular al plano de incidencia); b) Fotografía tomada con la dirección de polarización del filtro polarizador vertical (paralelo al plano de incidencia).

## BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

Para más detalles consultar los siguientes libros:

E. Hecht. *Óptica*. Addison-Wesley, (2000)

M. Yuste y C. Carreras. *Experimentos caseros para un curso de Física General*. Cuaderno de la UNED n.º 130, UNED (1993).

Carmen Carreras Béjar y Manuel Yuste Llandres  
Depto. de Física de los Materiales

---

## NUEVAS TECNOLOGÍAS EN ENSEÑANZA

---

### Proyecto de Potenciación de la Comunicación Científica

En este momento de tranquilidad que invierto en redactar este artículo me doy cuenta de que un alumno puede encontrar información matemática complementaria para estudiar la asignatura que imparto, realizar pruebas de autoevaluación y experimentar una situación similar a la prueba presencial, con sólo acceder a las páginas web de este departamento (<http://www.mat.uned.es>) y buscar mi asignatura (Análisis Matemático I, C. Físicas).

Quizás alguien pueda creer que esto constituye la meta que cualquier profesor de educación a distancia debe proponerse para “actualizar” su labor docente. Éste no es mi caso puesto que he dispuesto de páginas web desde el año que oposité a la plaza que ocupo. Sin embargo, me siento orgulloso de lo conseguido este curso y muy ilusionado

por lo que podamos conseguir a partir de este año: *El año de las Matemáticas*.

Si el lector se pregunta: ¿Qué es lo que tanto ilusiona al autor? No tendré mas remedio que remontarme al año anterior y hacer un poco de historia. En esencia contaré la transformación experimentada por un proyecto ideado por E. Bujalance García y M. Delgado Pineda para dotar al alumno de la UNED de material complementario interactivo relativo a las asignaturas de Álgebra II, de Ciencias Matemáticas, y Análisis Matemático I, de Ciencias Físicas. Éste se ha transformado en un proyecto de comunicación bidireccional mediante texto científico entre alumno y profesor.

¿Cuál es el objetivo fundamental de este proyecto? Éste consiste en cambiar de hecho la forma de atención al alumno de ciencias y tecnología en aquellas materias donde el contenido de fórmulas, gráficos y expresiones matemáticas dificultan la utilización de las tecnologías de la comunicación.

Es claro que cualquier proyecto con tal objetivo requiere reflexionar sobre aquellos factores que lo desencadenan. Hasta el curso pasado ocurría que la situación de la comunicación entre alumno y profesor requería un proyecto global en esta universidad, y éste se podía basar en la incorporación de forma real y sencilla de medios informáticos y en su utilización de forma compatible con la labor docente de cualquier profesor.

¿Quién no ha experimentado la dificultad de compaginar, temporalmente y espacialmente, la docencia con la distancia utilizando los medios de comunicación tradicionales? Esto se remarca en aquellas materias donde la forma de expresarse requiere elementos distintos de las palabras, elementos tales como fórmulas, gráficos, expresiones matemáticas, imágenes...

¿A quién no se la ha ocurrido que la elección de elementos catalogados de nuevas tecnologías aminora la mencionada dificultad? Claro que esa elección acarrea nuevas dificul-