

Práctica 4:

Efecto Faraday

Carlos Rubén Carrera Padilla, Orozco González Luis René
Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.
Fecha de entrega: 21 de abril de 2021

21 de abril de 2021

Resumen

Se estudio el efecto Faraday mediante el uso de un haz de luz monocromática (láser de 543.5 nm y 632.3 nm) que atravesaron una muestra de vidrio (Flint F2 Y SF5) inmersa en un campo magnético uniforme producido por un electroimán CENCO para medir la rotación del plano de polarización con un arreglo de polarizadores y con esto comprobar que existe una relación lineal entre la rotación, el campo magnético, la longitud de la muestra y la constante de Verdet tal que $\theta = V \cdot B \cdot L$. Se obtuvieron los siguientes resultados para la constante de Verdet: $V = 0.0042 \pm 1.2 \times 10^{-5} \frac{\text{rad}}{\text{Gm}}$, para un vidrio Flint SF5 a 543.5 nm, $V = 0.0038 \pm 1.2 \times 10^{-5} \frac{\text{rad}}{\text{Gm}}$, para un vidrio SF5 a 632 nm, $V = 0.00032 \pm 1.4 \times 10^{-5} \frac{\text{rad}}{\text{Gm}}$ para un vidrio F2 a 543.5 nm y $V = 0.0021 \pm 1.2 \times 10^{-5} \frac{\text{rad}}{\text{Gm}}$ para un vidrio F2 a 632.3 nm. Además también se observó y estimó cuantitativamente la actividad óptica del azúcar y jugo de naranja en distintas concentraciones para poder llegar a determinar si eran Dextrógiros o Levógiros.

1. INTRODUCCIÓN

Desde los inicios de la física como una ciencia formal se ha buscado describir con un lenguaje matemático los fenómenos naturales y además de relacionarlos con otros, para ello se investiga cada vez nuevas teorías y fórmulas que expliquen la relación entre más fenómenos. En el caso del electromagnetismo, primero se indagó sobre las fórmulas que detallan la interacción eléctrica y magnética por separado: Ley de Coulomb en 1785 y Ley de Biot-Savart en 1820, luego se construyó una teoría que especificara los dos fenómenos la cual fue propuesta por J.C. Maxwell en 1861, que además incluyó en su descripción a la radiación electromagnética. Dicha teoría fue incentivada por M. Faraday en 1845 de que realmente la luz y el electromagnetismo podían interactuar.

Faraday colocó una pieza de vidrio por el cual un haz de luz lo atravesaba, reflejaba dejando linealmente polarizado al haz, después, la luz incidía sobre la muestra de vidrio inmerso en un campo magnético externo, el haz se propagaba hasta un polarizador analizador, siendo que el haz permanecía linealmente polarizado pero había sufrido cierta rotación en el ángulo (*es por esto que el efecto Faraday también se le conoce como rotación de Faraday*), eventualmente se descubrió que la causa de esa rotación era el campo magnético inducido (\vec{B}) en la muestra de vidrio denso y que esta rotación era proporcional a la longitud de la muestra y la intensidad del campo eléctrico. (véase Figura: 2)

Normalmente las muestras isotrópicas ópticamente inactivas presentan propiedades birrefringentes (ópticamente activas) cuando son sometidas a campos o fuerzas externas, es por esto que cuando se coloca un campo

magnético orientado paralelamente a la dirección de propagación el haz de luz se muestra un cambio en el (los) índice (s) de refracción de la muestra. Este efecto es consecuencia directa del efecto Zeeman (*La división de las líneas espectrales por un campo magnético [1]*) y depende de propiedades del sistema como lo son la temperatura, composición de la muestra, su longitud y la longitud de onda.

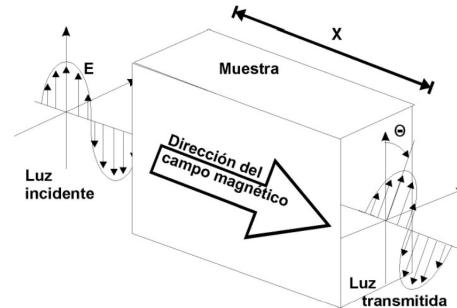


Figura 1: Efecto Faraday. Rotación del plano de polarización del vector \vec{E} en un ángulo θ al atravesar una muestra de longitud X [2] *Fundamentos de Óptica*.

1.1. Efecto Faraday

Si se tiene un haz de luz linealmente polarizado en la dirección D , este puede describirse como la superposición de un haz D con polarización circular dextrógiro y otro haz L con polarización circular levógiro con frecuencias similares. Al incidir sobre una muestra translúcida estas ambas componentes, D y L, se encuentran en fase $\Theta_D - \Theta_L = 0$; al atravesar ambas componentes se desfanan debido a que

una de las dos componentes se ve beneficiada dentro del material $\Theta_D - \Theta_L \neq 0$. Por lo que el haz transmitido posee un vector de campo eléctrico \vec{E} en un plano rotado un ángulo θ con respecto a la dirección inicial. Suponiendo distintos índices de refracción, como en el caso de la birefringencia, y conociendo la longitud del material se puede calcular el desfase que van a tener ambas componentes y el ángulo.

$$\theta = 12(2\pi \times \frac{L}{\lambda})(n_l - n_d) \quad (1)$$

Hay que tener en cuenta que dichos índices de refracción dependen de la frecuencia con la cual se incide y la longitud, L, del medio. El efecto Faraday se produce al aplicar un campo magnético a una muestra. Por lo tanto, la órbita de los electrones dentro del material presenta precesión alrededor de la dirección del campo aplicado. La frecuencia de precesión está dada por $\nu_l = \frac{eB}{4\pi m}$ donde e y m son la carga y la masa del electrón. Entonces las componentes L y D de la luz polarizada se hallaran interfiriendo con las con las frecuencias $\nu + \nu_l$, $\nu - \nu_l$. La diferencia de índices de refracción estará dada de la forma:

$$(n_l - n_d) = n(\nu + \nu_l) - n(\nu - \nu_l)$$

Suponiendo que las frecuencias son cercanas se tiene y desarrollando en serie:

$$\begin{aligned} (n_l - n_d) &= n(\nu + \nu_l) - n(\nu - \nu_l) \\ &\approx n((n(\nu) + \frac{dn}{d\nu})\nu_l) - ((n(\nu) - \frac{dn}{d\nu})\nu_l) \\ &= 2\nu_l \frac{dn}{d\nu} \end{aligned}$$

Sustituyendo la frecuencia de precesión ν_l y pasando a términos de la longitud de onda.

$$(n_L - n_D) \approx 2(\frac{eB}{4\pi m})(\frac{\lambda^2}{c} \frac{dn}{d\lambda})$$

De donde,

$$\theta = \frac{1}{2}(2\pi \frac{X}{\lambda})(2(\frac{eB}{4\pi m})(\frac{\lambda^2}{c} \frac{dn}{d\lambda})) \quad (2)$$

Por lo tanto,

$$\theta = V \cdot B \cdot L \quad (2)$$

Con :

$$V = \frac{e}{2mc} \lambda \frac{dn}{d\lambda} = \frac{1}{L} \frac{\partial \theta}{\partial H} \quad (3)$$

V se conoce como la constante de Verdet del medio, este valor asocia el poder de rotación del plano de polarización de luz por la distancia recorrida dentro de un material, L, inmerso en un campo magnético.

1.2. Actividad óptica.

La actividad óptica es cuando un haz de luz polarizado en un plano atraviesa algunos sólidos o líquidos, la orientación del plano de vibración cambia, rotando lentamente,

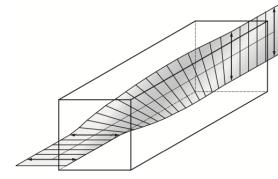


Figura 2: Actividad Óptica en un material. [3] *Óptica Básica*.

mientras viaja la luz dentro del material y a los materiales se les dice que son ópticamente activos.

Ejemplos: Cuarzo y la solución de azúcar

Dado un material la magnitud de la rotación es función del color siendo en general mayor para longitudes de onda menores. La rotación es además directamente proporcional a la longitud de onda atravesada.

Se define la rotación específica en **líquidos** como la rotación producida en una columna de 10cm de líquido que contenga un gramo de sustancia activa por centímetro de solución.[3] Por lo tanto, en una columna de t centímetros con W gramos por centímetro de solución y ρ la densidad, la rotación sera:

$$\theta = \frac{Wt}{10} \rho \quad (4)$$

Las sustancias que giran el plano de polarización en la dirección de un tornillo de rosca izquierda se dice que son dextrógiros y las que giran en la dirección de un tornillo de rosca se dice que son levógiros.

Cuando un cristal ópticamente activo se funde o se disuelve en una solución cada molécula preserva sus propiedades de doble refracción y actividad óptica. El conjunto sin embargo pierde la doble refracción. La razón es que la doble refracción de una molécula queda cancelada por la doble refracción de otra molécula con diferente orientación. La actividad óptica en cambio, no se pierde en la fusión o solución. Esto se debe a que cada molécula preserva su estructura torcida como tornillo, y un tornillo derecho conserva su sentido por cualquier lado que se le vea.

Objetivos.

- Medir la constante de Verdet de las muestras de vidrio Flint F2 (4.04 cm) y SF5 (4.04 cm).
- Observar y estimar cuantitativamente la constante la actividad óptica en azúcar y jugo de naranja artificial.

2. MÉTODO EXPERIMENTAL

2.1. *Materiales Efecto Faraday.*

En este experimento se utilizó un Electroimán CENCO modelo J no.079637 (con polarizador) y una Fuente de poder BK precisión modelo 1791 para generar el campo

magnético. Un Multímetro Steren y Gaussmetro FW Bell modelo 5180, fueron empleados para medir. La fuente de luz fue un par de láseres (rojo 632.8 nm y verde 532 nm). Como muestra se utilizaron vidrios Flint F2 (4.04 cm) y SF5 (4.04 cm). Para medir la variación en el ángulo de polarización se utilizó un polarizador lineal giratorio en escala de 1 y para observar la intensidad un multímetro digital conectado a una fotocelda.



Figura 3: Fotografía Arreglo Experimental efecto Faraday con algunos de los materiales señalados.

2.2. Desarrollo Efecto Faraday.

Lo primero que se realizó fue la desmagnetización del electroimán, que tiene como intención eliminar las corrientes espurias que pueda haber en el sistema. Para ello se conectó el electroimán en serie con el amperímetro STEREN y la fuente de poder, se colocó la punta del Gaussmetro entre las placas cónicas del electroimán. Antes de encender la fuente se revisó que tuviera los potenciómetros de voltaje y corriente en el mínimo, luego se encendió la fuente limitándola a 30 V. Para llevar a cabo la desmagnetización, se elevó la corriente hasta alcanzar 1.2 A, posteriormente se reduce la intensidad de 0.2 A hasta llegar a 0.0 A. Cada 0.2 A qué se reduce se debe invertir la corriente (conectar los cables de la fuente al electroimán al revés) y esperar 20 segundos.

Con este proceso se logró alcanzar una mínima lectura de campo magnético en el gaussmetro.

Una vez desmagnetizado se procede a la caracterización de electroimán. Para caracterizarlo se elevó la corriente eléctrica un paso de 0.30 A, aproximadamente, medidos por el amperímetro y se capturó la medida de campo magnético registrada por el gaussmetro; repitiendo hasta alcanzar aproximadamente los 3.9 A (máximo estable).

Para la siguiente parte del experimento se colocó el láser en un extremo del electroimán y en el otro el polarizador (análisis). Seguido del polarizador se colocó una fotocelda en un soporte universal. Dicha fotocelda se conectó al multímetro digital. Posteriormente se colocó la muestra (flint f2 o sf5) entre las placas y se alineó todo el arreglo para hacer que el láser, después de haber

atravesado el arreglo, incidiera en la fotocelda. Se trató de reducir las fuentes de ruido en particular originadas por reflexiones y difracción.

Después de alinear el láser se buscó la alineación los polarizadores inicial y final (análisis), esto con la intención de que el último dejara pasar la menor cantidad de energía del haz que recibiría la fotocelda, y marcar un 0° como punto de referencia.

A continuación, se procedió a realizar las mediciones necesarias para obtener la constante de Verdet de la muestra. Las mediciones consisten en medir el ángulo rotado por el plano de polarización de la muestra al aumentar la intensidad del campo magnético. El plano de polarización se puede conocer debido a que es el punto para el cual nuestro segundo polarizador registra un mínimo. Los datos capturados fueron la corriente y el ángulo de polarización. El campo magnético era determinado por la relación encontrada en la caracterización entre la corriente y el campo magnético.

Se aumentó la corriente de 0 a 3.9 A con un paso de 0.3 A y se buscó el ángulo para el cual la intensidad que pasaba por el segundo polarizador era mínima. Para conocer el mínimo de intensidad se observa la medición en el multímetro digital, correspondiente a la luz que llega a la fotocelda.

Se hizo el proceso para la otra muestra, y se repitió para el procedimiento para el otro láser.

2.3. Actividad óptica.

Para la realización de la actividad óptica se requiere del láser verde, polarizador (análisis), la fotocelda y el multímetro digital. Se utilizan, además, vasos graduados y recipientes cristalinos donde colocar las sustancias a analizar; y por supuesto, muestras de sustancias (azúcar blanca disuelta en agua y jugo de naranja rebajado con agua).

Se alinea el láser de tal forma que pase a través del recipiente cristalino (sin muestra) y el polarizador para por último incidir en la fotocelda. Al igual que en el efecto Faraday se busca el mínimo de intensidad. Posteriormente, se añade la sustancia al recipiente y se busca el nuevo ángulo del polarizador para el cual se observa un mínimo de intensidad de luz.

Finalmente, se repite el proceso con muestras con distintas concentraciones y se registra el ángulo que rota el plano de polarización de la luz.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La caracterización dio como resultado un comportamiento lineal entre la corriente aplicada a los electroimanes y el campo magnético generado en el intervalo de corriente utilizado 0.0 a 3.9 A con un voltaje constante de 30 V. Este comportamiento se observa en la figura 5. Del comportamiento se puede conocer la proporción entre el campo magnético y la corriente que



Figura 4: Fotografía Arreglo Experimental actividad óptica.

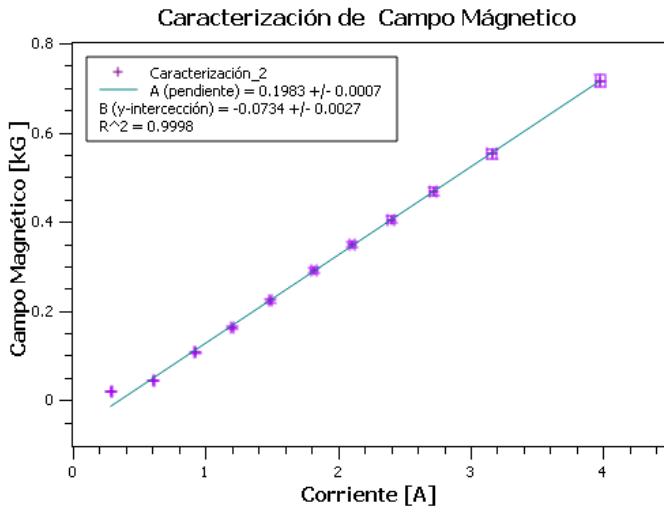


Figura 5: Gráfica de caracterización Corriente contra Campo Magnético.

la produce.

A continuación, se varió el corriente utilizado 0.0 a 3.9 A con paso de 0.3 A. Se registró el campo magnético generado y el ángulo en el cual cambia el plano de polarización de la luz con respecto a un cero. Estos son los resultado obtenidos para la muestras SF5 y F2 de 4.04cm con el láser rojo, figura 6 y 7, y con el láser verde, figura 8 y 9.

A partir de la pendiente de cada una de las gráficas se obtiene el poder de rotación de ángulo de polarización de nuestras muestras para ambas longitudes de onda

	Verde (543.5 nm)	Rojo (632.3 nm)
Vidrio SF5	0.0042 +/- 1.2e-5 radG/m	0.0038 +/- 1.2e-5 rad/Gm
Vidrio F2	0.0039 +/- 1.4e-5 rad/Gm	0.0021 +/- 1.2e-5 rad/Gm

Tabla 1: Constante obtenida para las muestras de vidrio SF5 y F2 con láser rojo y láser verde.

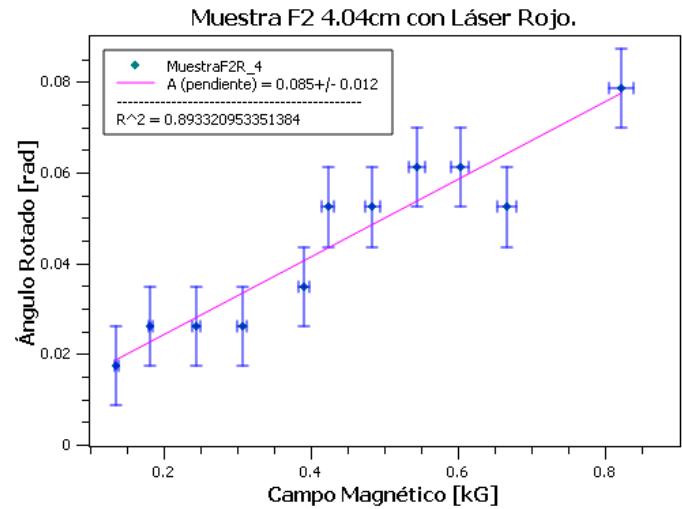


Figura 6: Gráfica para Muestra F2 con láser rojo.

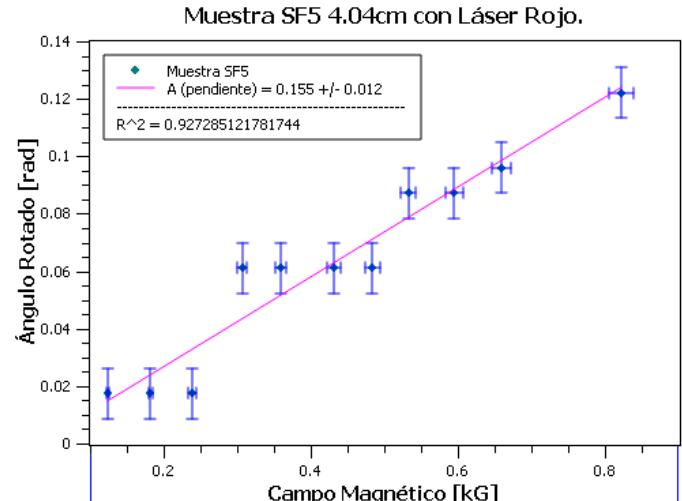


Figura 7: Gráfica para Muestra SF5 con láser rojo.

3.1. Actividad Óptica.

Realizando las mediciones de ángulo rotado para azúcar disuelta en agua y jugo de naranja artificial, a distintas concentraciones en 25 ml de agua, se obtuvieron los datos de la tabla 2. En la tabla 2 se considera como positivo

Jugo Naranja.	Ángulo Rotado	Azúcar.	Ángulo Rotado
1 ml	2 +/- 0.5	5 g	-4 +/- 0.5
2.1 ml	7 +/- 0.5	12 g	-7 +/- 0.5

Tabla 2: Actividad óptica para Jugo de Naranja rebajado con agua y Azúcar disuelta en agua.

el giro dextrógiro. Graficando los resultados, figura 10 y 11, Se observan pendientes contrarias, esto quiere decir que ambas soluciones poseen actividad óptica en sentidos

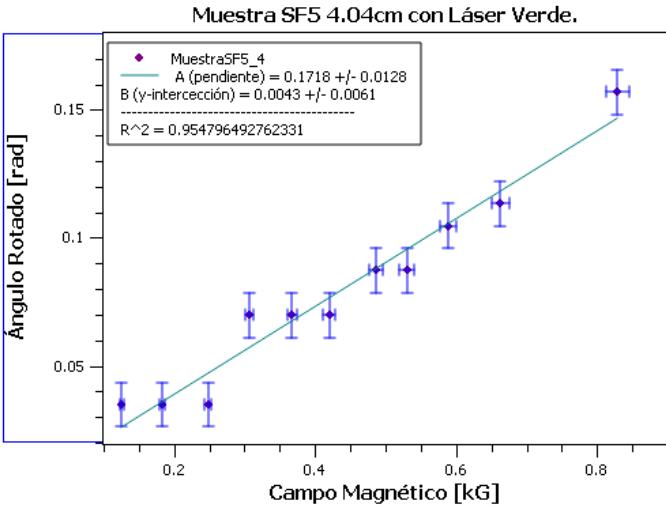


Figura 8: Gráfica para Muestra SF5 con láser verde.

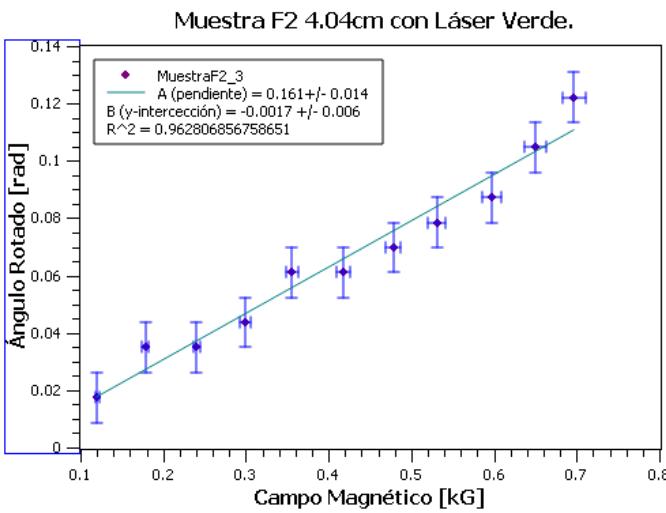


Figura 9: Gráfica para Muestra F2 con láser verde.

opuesto.

4. CONCLUSIONES

El plano de polarización de la luz que atraviesa un material como el vidrio flint rota cuando se aplica un campo magnético. La magnitud de rotación depende de varios factores, en esta práctica observamos tres de ellos: el material por el que pase la luz, la magnitud del campo magnético y la longitud de onda de la luz que se utilice, para longitudes de onda mayores, la constante de Verdet es menor; como se puede ver en la tabla 1 en la sección de análisis de resultados y discusión. Sin embargo, se sabe que la temperatura es un factor importante, aunque esto sale de los fines de esta práctica.

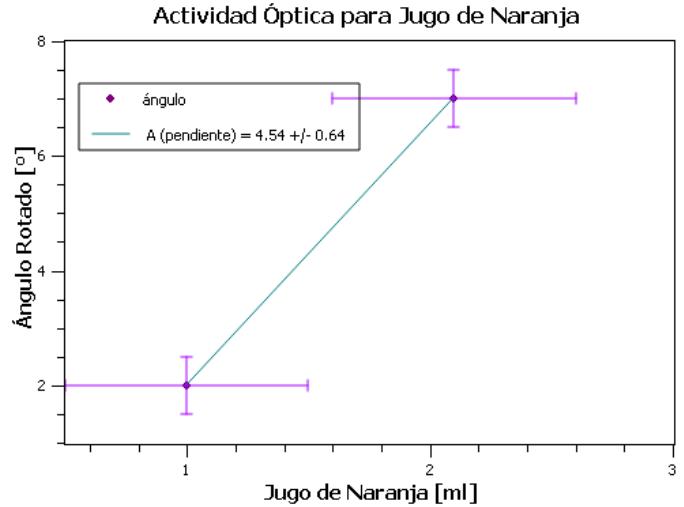


Figura 10: Gráfica de ángulo rotado contra mililitros de jugo de Naranja añadido en 25 ml agua.

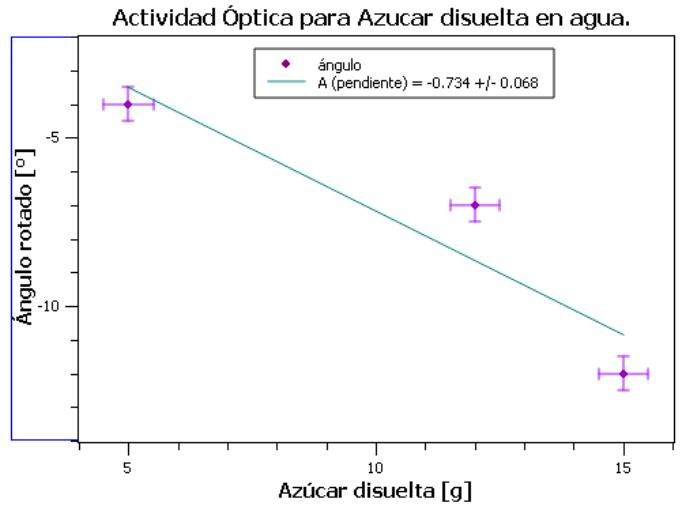


Figura 11: Gráfica de ángulo rotado contra gramos de azúcar disuelta en 25 ml agua.

REFERENCIAS

- [1] A. Beiser and A.N. Jaimes. *Conceptos de física moderna*. McGraw Hill, 1981. ISBN 9789684512351. URL <https://books.google.com.mx/books?id=WiOWAAACAAJ>.
- [2] B. Rossi. *Fundamentos de óptica*. Reverté, 1966. ISBN 9788429141405. URL <https://books.google.com.mx/books?id=RvsbwEACAAJ>.
- [3] D. Malacara. *Optica Basica*. Ediciones Científicas Universitarias. Fondo de Cultura Económica USA, 2015. ISBN 9786071632159. URL <https://books.google.com.mx/books?id=WHaRDAEACAAJ>.