

# **LABORATORIO III DE FÍSICA**

**(QUINTA EDICIÓN, 2022)  
REVISADA 2022**

**DOUGLAS R. FIGUEROA, LUIS E.  
GUERRERO, MARIA CRISTINA HERNÁNDEZ,  
ALFREDO SÁNCHEZ, NERY SUÁREZ, A.  
MARCANO, RAFAEL ESCALONA, Y  
EDUARDO D. GREAVES**



**LABORATORIO “D”  
Universidad Simón Bolívar**



## **LABORATORIO III DE FÍSICA**

Douglas Figueroa, Luis E. Guerrero, M.C Hernández, Alfredo Sánchez, A. Marcano, Nery Suárez, Rafael Escalona y Eduardo D. Greaves.

**© 2022 LABORATORIO D**

**5a. edición**

Universidad Simón Bolívar,  
Valle de Sartenejas, Baruta, Estado Miranda. Apartado postal 89000, Caracas 1080-A,  
Venezuela.

Teléfonos (58 212) 906-35 90, 906 35 21

FAX (58212) 906 35 19

**ASOCIACIÓN AMIGOS DE LA USB**

Diseño de colección Douglas Figueroa

Portada: Douglas Figueroa

Coordinación de producción: Eduardo D. Greaves

Composición y diagramación Douglas Figueroa y Eduardo D. Greaves

Impresión

LIMESAMA C.A.

# CONTENIDO

---

<b>PRÓLOGO</b>	PAG. i
<b>LISTA DE PRÁCTICAS</b>	
PRACTICA III--01- ONDAS SONORAS	PAG. III—01.1
PRACTICA III—02 VELOCIDAD DE LA LUZ	PAG. III—02.1
PRACTICA III—03 OPTICA GEOMÉTRICA I	PAG. III—03.1
PRACTICA III—04 POLARIZACION DE LA LUZ	PAG. III—04.1
PRACTICA III—05 INDUCCIÓN-Variante AC.	PAG III—05.1
PRACTICA III—06 MAGNETÓMETRO.	PAG. III—06.1
PRACTICA III—07 OPTICA GEOMETRICA-II.	PAG. III—07.1
PRACTICA III—08 INTERFERENCIA Y DIFRACCIÓN.	PAG III—08.1
PRACTICA III—09 ANILLOS DE NEWTON.	PAG. III—09.1
PRACTICA III—10 ESPECTROSCOPIA.	PAG. III—10.1
PRACTICA III—11 LEY DE BRAGG.	PAG. III—11.1
PRACTICA III—12 EFECTO FOTOELECTRICO.	PAG. III—12.1
PRACTICA III—13 EFECTO DOPPLER.	PAG. III—13.1
<b>APENDICE A1:</b> EL INFORME DE LABORATORIO	PAG. III—A1.1
<b>APENDICE A2:</b> USO DE LA COMPUTADORA.	PAG. III—A2.1
<b>APENDICE A3:</b> EL LÁSER.	PAG. III—A3.1

# PROLOGO

## **Prologo de la primera edición 1999.**

El presente texto es el tercero, y ultimo, de la serie "Laboratorio de Física" la cual sirve de guía y material de apoyo para la realización de las prácticas de los cursos básicos de laboratorio de física en la Universidad Simón Bolívar. Con este texto se culmina un trabajo altamente significativo desde el punto de vista metodológico para el mejoramiento de la enseñanza de los cursos básicos de naturaleza experimental. De la misma manera, representa una culminación del esfuerzo colectivo de un grupo de docentes, que hace cerca de cuatro años emprendieron la tarea de darle significado y relevancia al aprendizaje que obtendrían nuestros alumnos al cursar las asignaturas de laboratorio. Es preciso también reconocer en la culminación de este trabajo, la contribución de todos aquellos docentes involucrados en la elaboración de guías anteriores que sirvieron de base para escribir la presente.

La temática que se aborda en el texto esta asociada a los fenómenos de la física ondulatoria, vistos en manifestaciones de orden mecánico, electromagnético y cuántico. Se estudian importantes conceptos como son la velocidad de propagación, la reflexión y refracción, la difracción e interferencia, la polarización y la dualidad onda partícula, así como algunas aplicaciones de dichos conceptos en fenómenos fundamentales y de la vida cotidiana con la instrumentación científica moderna. Las experiencias seleccionadas permiten ilustrar el fenómeno en estudio, dentro de un nivel de tratamiento cuantitativo, manteniendo una exigencia relativamente moderada en cuanto a la sofisticación de los equipos requeridos. El curso esta basado en una metodología de trabajo en grupos de dos personas, con el apoyo de un computador para el procesamiento e interpretación de los datos obtenidos, y, en función de la disponibilidad de equipos, de la conducción de la misma practica por todos los grupos de trabajo. Las practicas, al igual que en los volúmenes anteriores, presentan los objetivos de la experiencia, listan los materiales requeridos, contienen una breve introducción teórica, indican actividades preliminares que debe realizar el alumno antes de venir al laboratorio, describen el procedimiento de obtención y el procesamiento de los datos experimentales, y finalmente, cierran con algunas preguntas relacionadas con aspectos meta cognoscitivos sobre el tema estudiado.

En el logro de esta meta deben destacarse varias contribuciones que han hecho posible su realización. En primer término, la contribución de la Sociedad de Amigos de la Universidad Simón Bolívar con donaciones para la dotación de computadoras; en segundo término, a la editorial Equinoccio por la publicación de estos materiales; en tercer término, a la política por parte del Laboratorio "D" y de la Unidad de Laboratorios para dar prioridad a la dotación y renovación de equipos para los laboratorios docentes; en cuarto termino, la entusiasta participación de alumnos y docentes en las fases de ensayo y validación de estas guías; y finalmente, al trabajo sistemático del grupo de docentes que han promovido y ejecutado este amplio proceso de cambio e innovación educativa buscando consolidar la comprensión de la física y la trascendencia del aprendizaje de nuestros alumnos.

*Profesora Nery Suarez 1999.*

## **Prólogo de la cuarta edición 2009**

Han pasado diez años desde la primera edición de estas guías de laboratorio. La obsolescencia de equipos, introducción de nuevos o distintos procedimientos de ejecutar las experiencias y la introducción de nuevas prácticas ha obligado a una revisión detallada de los textos y su modificación o adecuación a los nuevos equipos y procedimientos. Se ha

mantenido la filosofía general del curso pero incorporando la tendencia de los últimos años de orientarlo mas hacia el área de óptica y ondas a expensas de experiencias de fenómenos eléctricos o electrónicos. Varias prácticas de esta última índole, las cuales se han retirado en esta edición, han sido incorporadas en el Laboratorio II de Física. Textos confusos y procedimientos incorrectos que daban lugar a dudas y dificultades de entendimiento han sido re-escritos o corregidos en esta edición.

Gracias a la participación del Grupo de Física Nuclear, Profesores Haydn Barros y el suscrito, en una competencia internacional de la empresa Hewlett-Packard (HP) en el campo educativo, la USB se hizo acreedora de un premio consistente en un lote de 21 Computadoras HP Tablet-PC y recursos monetarios para el desarrollo de experiencias docentes en la adquisición y control de datos mediante este nuevo instrumento computacional. La implementación de este proyecto, que se inició en 2007, ha resultado en la afectación de tres experiencias: Anillos de Newton, Ondas Sonoras y Efecto Doppler. En los primeros dos casos se trata de la automatización de formas de adquisición mediante análisis de imágenes y control de la experiencia. En el tercer caso se ha implementado una nueva experiencia sobre el efecto Doppler que hace uso de ondas sonoras en el rango ultrasónico. Es una experiencia ambiciosa por su extensión y complejidad en el diseño, completamente realizada en la USB a través de proyectos de estudiantes avanzados de física, electrónica y matemáticas aplicadas. Es un complemento a la existente experiencia de Ondas Sonoras e introduce a nuestros estudiantes al ultrasonido que tiene modernas aplicaciones en la medicina así como a las técnicas de ensayos no destructivos.

La facilidad de comunicación inalámbrica de las HP Tablet-PC ha permitido la introducción en el curso del acceso al INTERNET de forma de facilitar la búsqueda de información en línea que es pertinente a las experiencias.

Hay que agradecer la constante colaboración de los técnicos e ingenieros que laboran en el mantenimiento y operación del complejo sistema de instrumentación del curso, específicamente: Ing. Eva Mora y TSU Tadeo Guerra en el apoyo computacional y Tec. Efraín Montilla, TSU Joel Chirinos y TSU Kervin Pimentel. Se agradece encarecidamente la donación de las HP Tablet-PC por parte de la empresa Hewlett-Packard de Venezuela.

*Prof. Eduardo D. Greaves. 2009.*

### **Prólogo de la quinta edición 2022.**

En esta edición se corrigieron en las guías pequeños errores que se fueron detectando durante las ejecuciones de las prácticas en años anteriores.

Los instrumentos usados en la practica 2, Velocidad de la luz, fueron usados para medir la velocidad de la luz en una sola dirección (No ida y vuelta como es usual). El trabajo fue publicado y ha sido objeto de controversia y de amplia discusión en la literatura hasta el presente. La referencia se presenta a continuación:

E. D. Greaves, An Michel Rodríguez, Jose G. Ruiz-Camacho. A One-way Speed of Light Experiment. Am. J. Phys. **77** (2009) 194-196

*Prof. Eduardo D. Greaves. Abril de 2022.*

## ONDAS SONORAS ESTACIONARIAS Y RESONANCIA

### OBJETIVOS

- Estudiar las ondas estacionarias y la resonancia en columnas de aire.
- Determinar las frecuencias de resonancia de un tubo de longitud establecida.
- Determinar la velocidad de propagación del sonido en el aire.

### MATERIALES

1. Tubo de vidrio limitado en un extremo por una columna de líquido.
2. Recipiente plástico para líquido.
3. Tubo de vidrio de longitud variable, con ambos extremos abiertos.
4. Manguera flexible.
5. Generador de audiofrecuencias, osciloscopio y corneta
6. Alternativamente: Corneta con conexión, micrófono Tablet PC con programa.
7. Base con soportes.
8. Cable de conexión.
9. Regla.

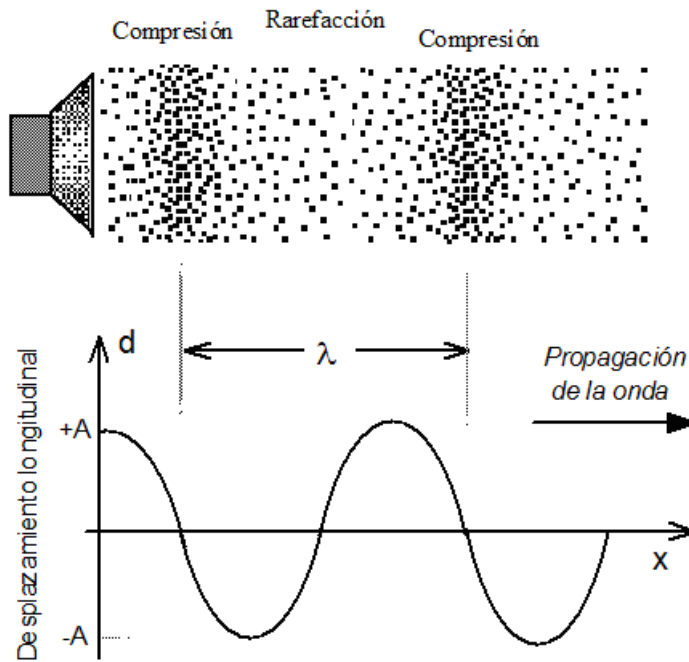
### TEORIA

#### I. Propagación del sonido

Usualmente el sonido se refiere a la sensación física que estimula nuestros oídos. Estas son las llamadas ondas audibles que caen dentro del rango de frecuencias de 20 Hz a 20 kHz. También existen vibraciones sonoras con frecuencias mayores a 20 kHz, que se denominan *ultrasonidos* y las menores de 20 Hz que se denominan *infrasonidos*.

La fuente de una onda sonora es por lo general un objeto vibrante. Por ejemplo, cuando se hace vibrar eléctricamente el diafragma de un altavoz, las moléculas de aire próximas oscilarán respecto de sus posiciones de equilibrio, chocando con las moléculas vecinas y haciéndolas oscilar.

Se produce así una serie de compresiones (donde las partículas se juntan momentáneamente) y expansiones o rarefacciones (donde se separan momentáneamente). Las regiones alternas de compresión y rarefacción se propagan como una onda periódica en el aire, como se muestra en la figura.



**Fig. 1:** Desplazamiento longitudinal de las partículas en función de la posición  $x$  para una onda sonora.

Observe que el desplazamiento de las partículas es a lo largo de la dirección de propagación de la perturbación (eje  $x$ ), es decir, la onda sonora es "longitudinal".

El desplazamiento de las partículas hace que su densidad en un punto aumente o disminuya, lo cual depende de si el gas se desplaza hacia el punto o se aleja de él. Si la densidad aumenta (o disminuye) en un punto la presión aumenta (o disminuye) en dicho punto. Por esa razón las ondas sonoras pueden ser consideradas como una onda de desplazamiento o como una onda de presión.

Las ondas sonoras pueden viajar a través de cualquier medio material (gases, líquidos o sólidos) con una velocidad que depende de las propiedades del medio. La velocidad de propagación está relacionada con la longitud de onda  $\lambda$  (distancia entre dos compresiones o rarefacciones sucesivas), y con la frecuencia  $f$  (número de compresiones que pasan por un punto por segundo), a través de la relación:

$$V = \lambda f$$

Si la fuente vibra con movimiento armónico simple, la perturbación que resulta será una onda sonora armónica que puede representarse como un desplazamiento:

$$d = A \cos(kx - \omega t)$$

en donde A es la amplitud o máximo desplazamiento a partir del equilibrio,  $k = 2\pi/\lambda$  recibe el nombre de número de onda y  $\omega = 2\pi f$  es la frecuencia angular.

## II. Ondas sonoras estacionarias

La expresión anterior representa una onda armónica que "viaja" en la dirección positiva del eje x. Un fenómeno interesante surge cuando se combinan dos ondas de las mismas características, que viajan en sentidos opuestos:

$$d_1 = A \cos(kx - \omega t) \qquad d_2 = A \cos(kx + \omega t).$$

La adición de estas dos funciones produce la función de onda resultante:

$$d = d_1 + d_2 = (2A \cos kx) \cos \omega t.$$

*Amplitud*

Esta expresión representa una "onda estacionaria" porque no viaja ni en un sentido ni en el otro y cada partícula vibra con la misma frecuencia, pero la amplitud de vibración depende de x. Esto contrasta con una onda viajera en la que todas las partículas por donde va pasando la onda oscilan, y con la misma amplitud.

En la onda estacionaria hay puntos llamados "vientres" donde ocurre interferencia constructiva y la amplitud de oscilación es máxima, la condición  $\cos kx = 1$ , implica  $d = 2A \cos \omega t$  para:

$$kx = 0, \pi, 2\pi, 3\pi, \dots \text{etc.} \qquad x = 0, (\lambda/2), 2(\lambda/2), 3(\lambda/2), \dots \qquad (\text{Vientres})$$

También hay puntos llamados "nodos" donde ocurre interferencia destructiva y su amplitud de vibración es cero, la condición  $\cos kx = 0$ , implica  $d = 0$  para :

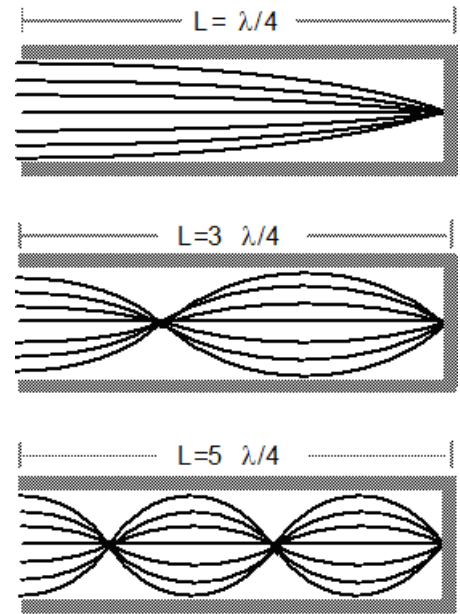
$$kx = \pi/2, 3(\pi/2), 5(\pi/2), \dots \text{etc} \qquad x = (\lambda/4), 3(\lambda/4), 5(\lambda/4), \dots \qquad (\text{Nodos})$$

En la práctica se producen ondas estacionarias cuando una onda incidente se refleja hacia atrás por algún tipo de condición de borde impuesta por la discontinuidad en el medio.

Supongamos que se tiene una columna de aire con un extremo abierto y el otro cerrado (Fig. 2). Las ondas emitidas por una fuente colocada en el extremo abierto viajan hacia el otro extremo. Como el aire no puede vibrar y pasar del extremo cerrado, este punto debe ser un nodo de desplazamiento. Justamente como sucede en el extremo fijo de una cuerda vibratoria, la onda se invierte y se refleja.

Las ondas incidentes y reflejadas en el tubo se combinan y las longitudes de onda permitidas son aquellas que pueden ajustarse dentro de la longitud del tubo, para las cuales esta interferencia da como resultado una onda estacionaria con un nodo de desplazamiento en un extremo y un vientre en el otro. Los patrones de onda estacionaria que resultan están ilustrados en la Figura 2.

Si el extremo de la columna de aire está abierta a la atmósfera, las moléculas de aire tienen libertad completa de movimiento, y allí ocurre un vientre de desplazamiento. En este caso, al igual que en el extremo libre de una cuerda la onda reflejada está en fase con la onda incidente.



**FIG. 2:** Ondas estacionarias en un tubo con un extremo cerrado

La suposición de que en el extremo abierto del tubo existe un vientre de desplazamiento se basa en que la onda sonora viaja en una dirección. Esto es aproximadamente cierto si el diámetro de tubo es pequeño comparado con la longitud de onda del sonido.

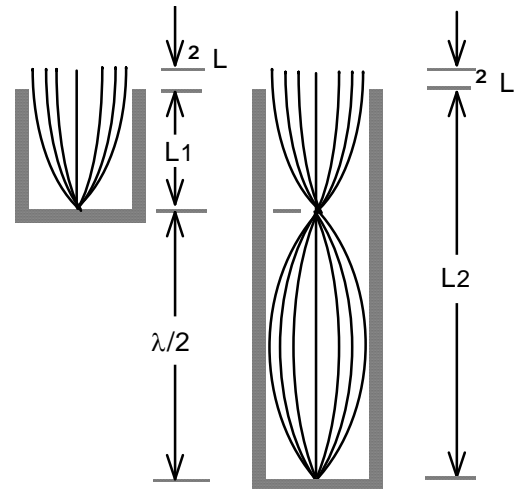
Hablando estrictamente, el vientre de desplazamiento ocurre un poco más allá del extremo abierto del tubo (Fig. 3).

Por consiguiente, la longitud efectiva del tubo es un poco mayor que la verdadera longitud:

$$L_{\text{eff}} = L + \Delta L$$

Siendo  $\Delta L$ , una longitud de corrección que en la práctica es una fracción del diámetro del tubo.

Observe que la distancia entre nodos (y entre vientres) sucesivos sigue siendo todavía  $\lambda/2$ , aunque la distancia del extremo abierto al primer nodo es ligeramente menor que  $\lambda/4$ .



**Fig. 3:** Primera y segunda longitudes para obtener ondas estacionarias en un tubo con un extremo cerrado.

### **III. Resonancia acústica**

Hemos visto que en un tubo cerrado en un extremo, se pueden establecer ondas estacionarias, para longitudes de onda que sean compatibles con la longitud  $L$  del tubo:

$$\lambda_1 = 4L, \quad \lambda_2 = (4/3)L, \quad \lambda_3 = (4/5)L, \quad \text{etc.}$$

En términos de la velocidad del sonido, podemos obtener las correspondientes frecuencias usando la relación  $v = \lambda f$ :

$$f_1 = (v/4L), \quad f_2 = 3(v/4L), \quad f_3 = 5(v/4L), \quad \text{etc.}$$

o, en general, se tiene:

$$\boxed{f = n\left(\frac{v}{4L}\right)} \quad n = 1, 3, 5, 7, \dots \text{ (tubo cerrado en un extremo).}$$

Las frecuencias a las que se producen las ondas estacionarias son las frecuencias naturales o de "resonancia" del tubo de longitud  $L$  dada y forman una serie, donde cada una es un múltiplo entero de la más baja llamada "frecuencia fundamental" o "primer armónico".

Cuando la frecuencia de excitación del altavoz coincide con una de estas frecuencias naturales, las ondas estacionarias que se inducen en el tubo pueden llegar a ser suficientemente intensas. Este experimento se basa en el fenómeno de la resonancia como técnica para determinar la velocidad del sonido en el aire.

### **ACTIVIDADES PRELIMINARES**

- 
- a) Demuestre la expresión para la onda estacionaria:  $y = (2A \cos kx) \cos \omega t$ .
- b) Deduzca la expresión general para las frecuencias de resonancia en un tubo abierto en ambos extremos.
-

## PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

**NOTA:** Esta práctica se puede realizar utilizando como fuente de sonido un generador de funciones y para medida un osciloscopio o el sistema descrito en el apéndice de esta guía.

### A. Frecuencias de resonancia para un tubo de longitud fija.

A continuación se realizará una experiencia cualitativa en la cual se fija la altura de la columna de aire y se varía la frecuencia de la onda sonora con el generador.



**¡IMPORTANTE!**

*Para no causar daños a sus oídos ni molestar a sus vecinos, se recomienda trabajar en el laboratorio con el mínimo volumen posible del sonido del altavoz*

**A1.** Fije la altura "L" de la columna de aire entre 15 y 25 cm.

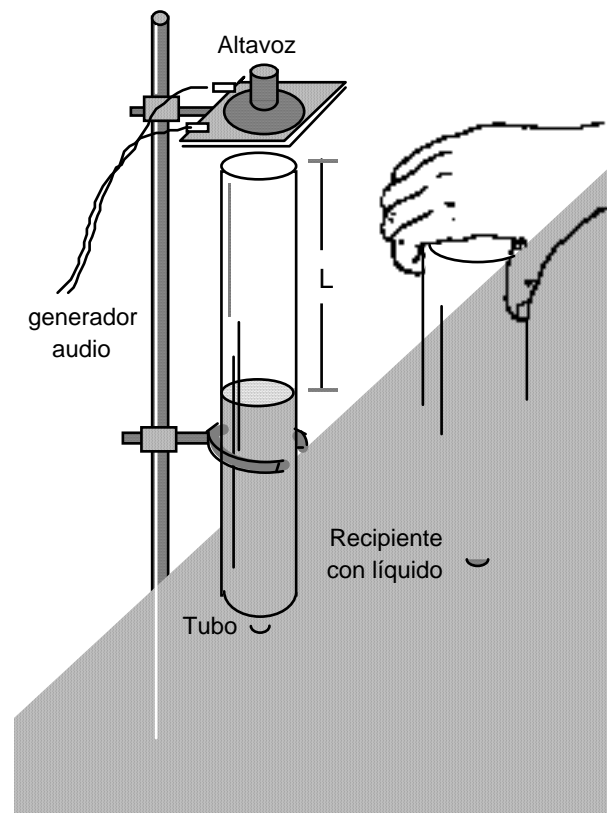
*Acerque un oído a la boca del tubo mientras va aumentando la frecuencia del generador progresivamente, a partir de un valor mínimo de 100 Hz.*

**A2.** Registre varias frecuencias para las cuales se perciba el fenómeno de resonancia.

**A3.** Calcule la razón entre cada una de las frecuencias obtenidas y la frecuencia fundamental.

**A4.** Establezca la serie teórica de frecuencias de resonancia correspondiente a la longitud dada.

**A5.** Dibuje las ondas estacionarias para cada una de las frecuencias de la serie registrada. (Como la Fig. 2)



**Fig. 4:** Montaje experimental para el tubo cerrado en un extremo

*A continuación se realizarán dos experiencias con el tubo cerrado en un extremo, en las cuales la variable independiente es la frecuencia y la variable dependiente es la altura de la columna de aire.*

## **B. Determinación de la velocidad del sonido y la longitud de corrección (tubo cerrado en un extremo).**

**B1.** Seleccione una frecuencia del generador dentro del rango: 300 Hz - 1000 Hz. Partiendo de una columna de "aire" pequeña, vaya aumentando la altura de esta columna de aire hasta escuchar la "resonancia".

*En la posición anterior se tiene la formación de un cuarto de onda estacionaria. Sin embargo, el vientre no se encuentra exactamente en la boca del tubo sino a una cierta distancia  $\Delta L$  por encima del borde. En consecuencia, se cumple la relación:*

$$L + \Delta L = \lambda/4$$

**B2.** Mida la distancia entre el borde del tubo y la posición del líquido para la primera resonancia, Repita para cinco diferentes frecuencias dentro del rango recomendado: 300 Hz - 1000 Hz.

**B3.** Grafique el inverso de la frecuencia en función de la longitud medida.

**B4.** Escriba la ecuación que mejor representa a la curva obtenida y determine los parámetros correspondientes: pendiente y punto de corte con el eje vertical.

**B5.** Determine la velocidad del sonido y estime su respectivo error.

**B6.** Determine el valor de la longitud de corrección  $\Delta L$ .

## **C. Determinación de la velocidad del sonido usando resonancias consecutivas de la onda (tubo cerrado en un extremo).**

**C1.** Seleccione una frecuencia del generador en el rango: 300 Hz - 1000 Hz y aumente la altura de la columna de aire hasta detectar la primera resonancia. Continúe aumentando la longitud de la columna de aire hasta detectar la segunda resonancia. Al ubicar el nivel del líquido en la posición de la segunda resonancia se tiene que en la columna de aire se forma un patrón que tiene tres cuartos de longitud de onda.

Si medimos desde el borde del tubo la distancia al nivel del agua con la primera resonancia y lo mismo a la segunda resonancia, y luego obtenemos la diferencia entre estas longitudes, se elimina el factor de corrección  $\Delta L$ .

$$L_1 = \lambda/4 - \Delta L; \quad L_2 = 3\lambda/4 - \Delta L \quad \text{luego} \quad L_2 - L_1 = \lambda/2 ;$$

**C2.** Mida las respectivas distancias  $L_2$  y  $L_1$  para cinco diferentes frecuencias.

**C3.** Grafique  $1/f$  en función de la distancia ( $L_2 - L_1$ ).

**C4.** Escriba la ecuación que mejor represente a la curva obtenida y determine los parámetros correspondientes: pendiente y punto de corte con el eje vertical.

**C5.** Determine la velocidad del sonido y estime su respectivo error.

### **D. Determinación de la velocidad del sonido y la longitud de corrección (tubo abierto en ambos extremos).**

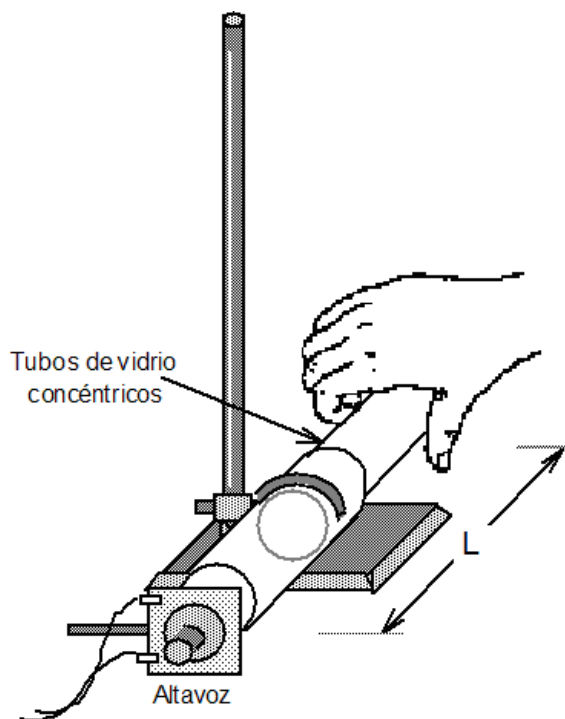
En esta última parte del experimento se trabajará con un tubo "abierto en ambos extremos", cuya longitud puede variarse.

**D1.** Desmunte el altavoz del experimento anterior y colóquelo en un extremo del par de tubos deslizantes, los cuales deben estar en posición horizontal.

Al variar la frecuencia del generador, se puede observar que, para una determinada longitud, existe un valor mínimo de frecuencia de resonancia que corresponde a la frecuencia fundamental. En este caso, se forma un vientre en cada extremo del tubo y un nodo en el centro; de esta manera la distancia entre los dos vientres equivale a media longitud de onda.

**D2.** Para distintas frecuencias en el rango audible, encuentre la distancia  $L$  del modo fundamental. Obtenga pares de datos de frecuencia y longitud del tubo.

**D3.** Grafique  $1/f$  en función de la longitud del tubo para  $f$  entre 400 y 600 Hz.



**Fig. 5:** Montaje experimental para el tubo abierto en ambos extremos

**D4.** Escriba la ecuación que mejor represente a la curva obtenida y determine los parámetros correspondientes: pendiente y punto de corte con el eje vertical. Considere que en este caso existe un factor de corrección  $\Delta L$  por cada extremo del tubo.

**D5.** Determine la velocidad del sonido con su respectivo error.

**D6.** Compare los valores de la velocidad del sonido obtenidos por los diferentes procedimientos y explique las ventajas y desventajas que presenta cada uno de ellos.

## **PREGUNTAS**

1. Cierta tubo tiene una frecuencia fundamental de 100 Hz y las frecuencias de resonancias mas altas que siguen son 300 Hz y 500 Hz. ¿De que tubo se trata? ¿Abierto en ambos extremos? ¿Cerrado en ambos extremos?, ¿Cerrado en un solo extremo?
2. ¿Dónde se propaga más rápido el sonido, en los sólidos, líquidos o gases?. Explique.
3. Una onda estacionaria parece estar quieta mientras que una onda viajera parece moverse. Aclare esta aseveración desde el punto de vista de la energía de la onda.
4. La resonancia es un fenómeno de gran importancia que ocurre en diversos campos de la física. Cite tres ejemplos de situaciones donde se pone de manifiesto la resonancia. Explique.

## **REFERENCIAS**

1. R. A. Serway, *Física*, tomo 1, Cuarta edición, Caps. 17 y 18, Mc Graw-Hill (1996).
2. P. Fishbane, S. Gasiorowicz y S. Thornton, *Física*, Vol. 1, Caps. 14 y 15, Prentice-Hall Hispanoamericana (1994).
3. D. Halliday, R. Resnick y K. Krane, *Física*, Vol. 1, Caps. 19 y 20, Ed. Continental (1995).
4. P. A. Tipler, *Física*, tomo 1, segunda edición, Caps. 14 y 15, Editorial Reverté (1985).

## APENDICE Ondas Sonoras

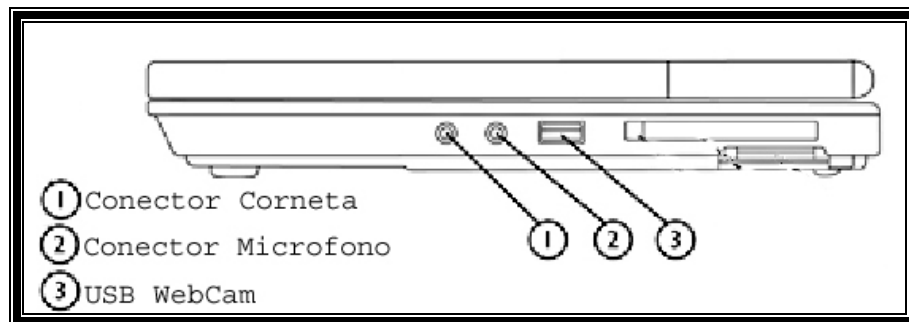
### Uso de HP Tablet PC

Con motivo de la donación por parte de la Empresa Hewlett Packard (HP) a la USB de 21 computadoras HP Tablet PC se inició un proceso de modernización de las prácticas del Laboratorio III, FS2282. El proceso consiste, fundamentalmente, en usar las nuevas PC en funciones de adquisición directa (Hardwire) de los datos y control de los experimentos así como de aprovechar la conectividad inalámbrica de esta tecnología. En el caso de la práctica de Ondas Sonoras la PC substituye al generador de funciones y al osciloscopio. Puede además de cumplir la función de hacer las medidas lineales de la columna de aire dentro del tubo de vidrio. **Nota:** Esta última función puede no estar implementada en su equipo. Consulte con su profesor.

#### Conexión de la instrumentación.

Detalles de las conexiones a hacer: Ver la Figura 1.

- A) Conecte el cable que va hasta la corneta al enchufe (1),
- B) Conecte el micrófono en (2),
- C) Conecte la cámara WebCam Genius en un puerto USB (3) de la HP Tablet PC. (Solo si esta función está implementada en su equipo).



**Figura 1** Puntos de conexión de la corneta, micrófono y cámara.

#### Iniciación del programa.

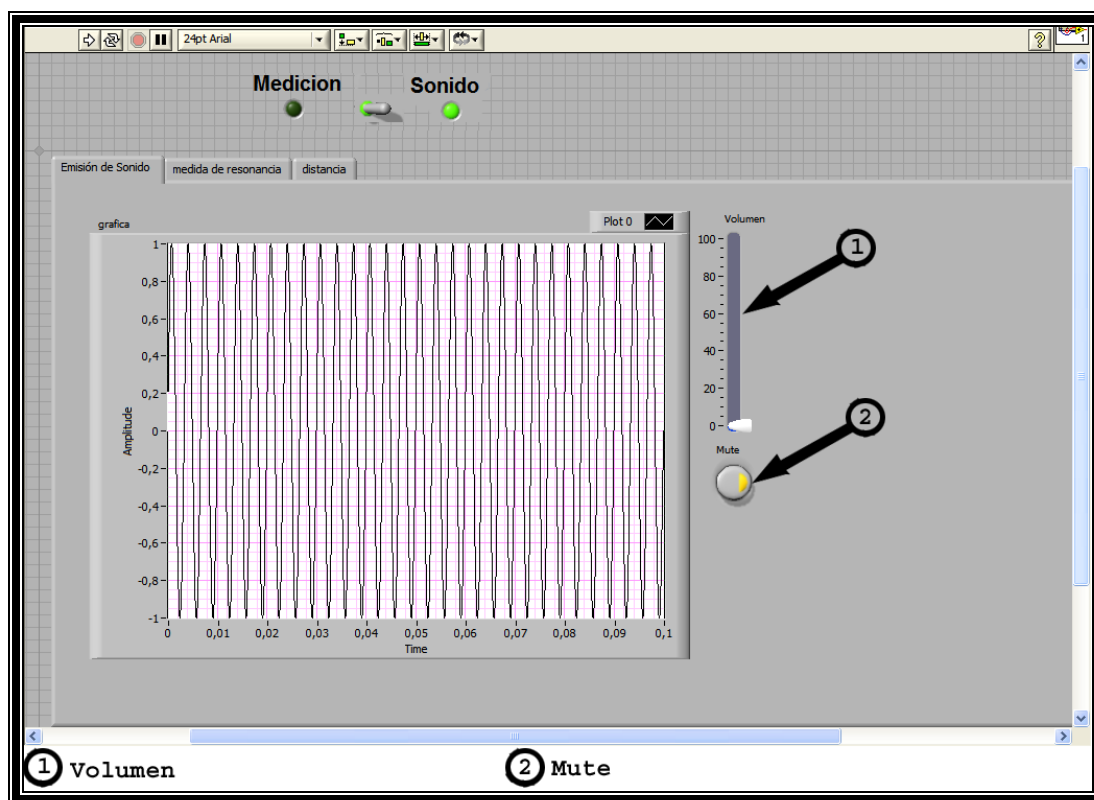
El programa a iniciar tiene un acceso directo en el desktop de su laptop, llamado Práctica Resonancia.

El programa funciona en tres modos. Cada modo se activa pisando el TAB correspondiente. (Lado superior izquierdo de la grafica) Ver las figuras 2, 3 y 4. Los tres modos de funcionamiento son: EMISIÓN DE SONIDO, MEDIDA DE RESONANCIA y DISTANCIA. Se pasa de un modo de operación a otro pisando el TAB correspondiente.

#### Modo EMISIÓN DE SONIDO

El modo EMISIÓN DE SONIDO y medida de la resonancia se obtiene pisando el TAB EMISIÓN DE SONIDO. Ver figura 2. La HP Tablet PC genera una onda sinusoidal substituyendo al generador de funciones. Esta onda se aplica a la corneta que está en

el tope de la columna. La frecuencia generada se puede controlar en un rango desde 300 Hz hasta 1000Hz (1kHz). **Nota.** El control para variar la frecuencia se encuentra en el MODO MEDIDA DE RESONANCIA (Figura 3). Esto está hecho con la finalidad de facilitar el uso de esta herramienta.



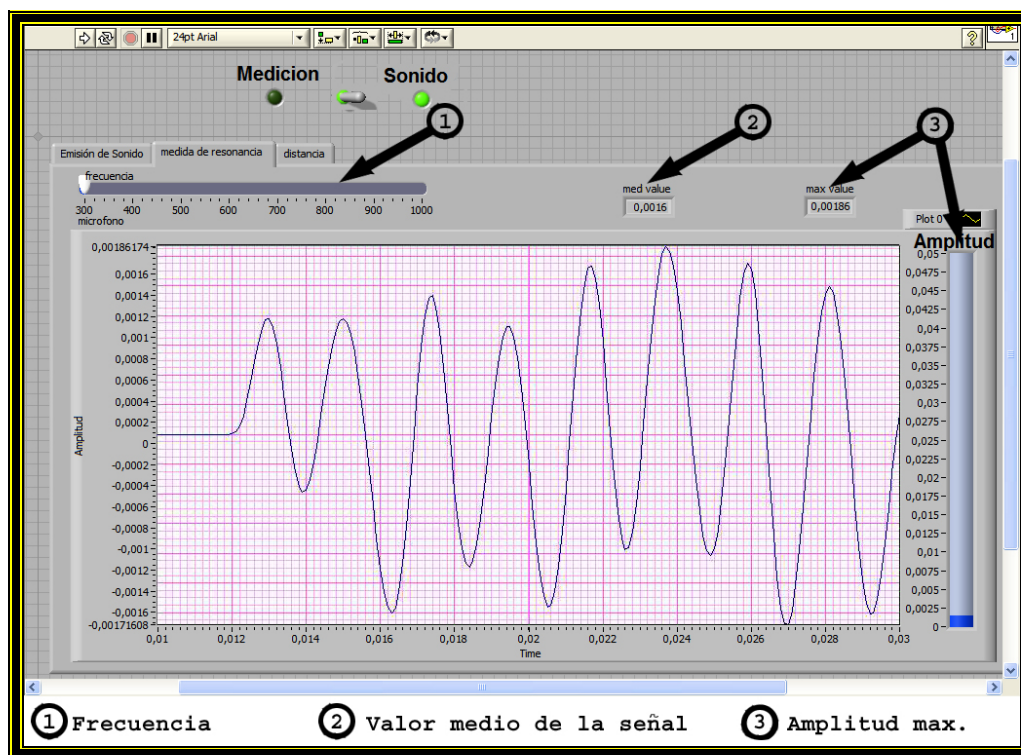
**Figura 2** (1).- Volumen (control en el lado derecho de la gráfica) Se cambia arrastrando el cursor en dirección vertical. (2).- Mute (Control en el lado derecho) Tiene dos posiciones que se controlan haciendo clic sobre el botón: APAGADO (Apaga el sonido, color amarillo) y ENCENDIDO (Enciende el sonido, color rojo)

### Modo MEDIDA DE RESONANCIA.

En este modo la pantalla muestra la onda que la PC percibe mediante el micrófono. Del lado derecho hay una columna azul cuya altura es proporcional a la amplitud de la onda captada por el micrófono. El valor máximo permisible de esta columna se puede modificar cambiando el número en el tope superior izquierdo de la columna (Valores permisibles son desde 0.0001 hasta aproximadamente 0.05) El gráfico muestra una onda sinusoidal variable que representa la onda captada por el micrófono. En la parte superior está el control de la frecuencia. La frecuencia se cambia en el rango de 300 a 1000 Hz arrastrando el cursor del control de derecha a izquierda (con el lápiz HP, o con el cursor). Sobre el cursor de cambio de frecuencia aparece un número que contiene la frecuencia en unidades de Hz.

La forma de operación es: Con el interruptor en SONIDO y ajustando a un volumen adecuado, (modo EMISIÓN DE SONIDO) modificar la frecuencia

paulatinamente y observar la columna de amplitud. Cercano al valor mayor de amplitud, modificar la frecuencia cuidadosamente hasta conseguir el punto en que la amplitud logra un valor máximo.

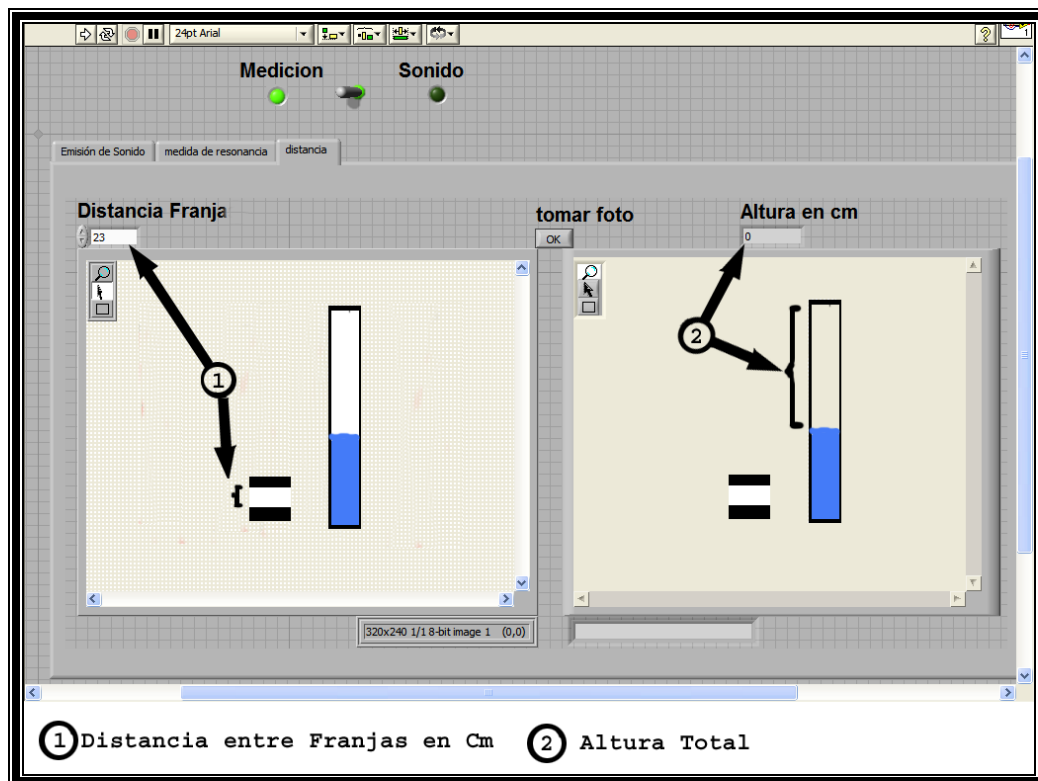


**Figura 3.** Pantalla que muestra los tres TABs para cambiar los modos de operación. En la parte superior del gráfico hay un interruptor o swiche para pasar de la función “Medición” a la función “Sonido” Este interruptor se controla con un clic sobre el interruptor.

### Modo de DISTANCIA

**Nota:** Esta función puede no estar implementada en su equipo. Consulte con su profesor.

En este modo la HP Tablet PC toma una foto de la columna y deriva de esa foto la altura de la columna. Cuando se desee una medida de la altura de la columna se procede a tomar una foto de la columna. La medida de la altura de la columna requiere que en la foto aparezca del lado inferior izquierdo de la columna la imagen de una “referencia de control” que debe ser un objeto blanco y negro como se muestra en (1) en la Figura 4 Esta figura muestra lo que se obtiene pisando el TAB DISTANCIA. La separación entre las franjas negras de la referencia de control hay que medirlas con una regla en centímetros y dar este valor al programa en la casilla “Distancia franjas” (1) en la Figura 4. Esta distancia la usa el programa como referencia de longitud para convertir la altura de la columna medida en PIXELS en altura medida en centímetros. La pantalla de la HP Tablet PC muestra la imagen real y la imagen en binario. Esta última es la que se usa para derivar la medida. El resultado de la medida de la longitud de la columna aparece en pantalla en la casilla “Altura en cm” (2) en la Figura 4.



**Figura 4.** Pantalla que se obtiene en el modo de DISTANCIA. Muestra la imagen real de la columna y la imagen en binario. El numeral (1) identifica la “Referencia de control” la cual debe ser una tarjeta o un papel con dos franjas negras horizontales y un espacio en blanco entre ellas. La altura total debe ser aproximadamente 10 cm. El numeral (2) muestra la distancia total medida desde la superficie del agua hasta la corneta ubicada en el tope de la columna.

#### ***Procedimiento para tomar la foto y medir la altura de la columna***

Colocar la cámara WebCam Genius en un soporte universal o en un trípode y ubicarla a una distancia de aproximadamente un (1) metro de la columna. Ajustar la orientación hasta que la imagen en pantalla luzca adecuada. Colocar en el recuadro “Distancia franjas” el valor en centímetros de la separación entre las franjas negras de la “referencia de control”. Para tomar la foto pisar el botón “Tomar foto”

**Agradecimientos.** El programa descrito para la experiencia Ondas Sonoras fue desarrollado por el Br. Jesús Bastardo de Ing. Electrónica, bajo la dirección del Prof. Haydn Barros. Abril de 2007.

## *DETERMINACION DE LA VELOCIDAD DE LA LUZ*

### **OBJETIVOS**

- Medición de la velocidad de la luz mediante un láser modulable

### **MATERIALES**

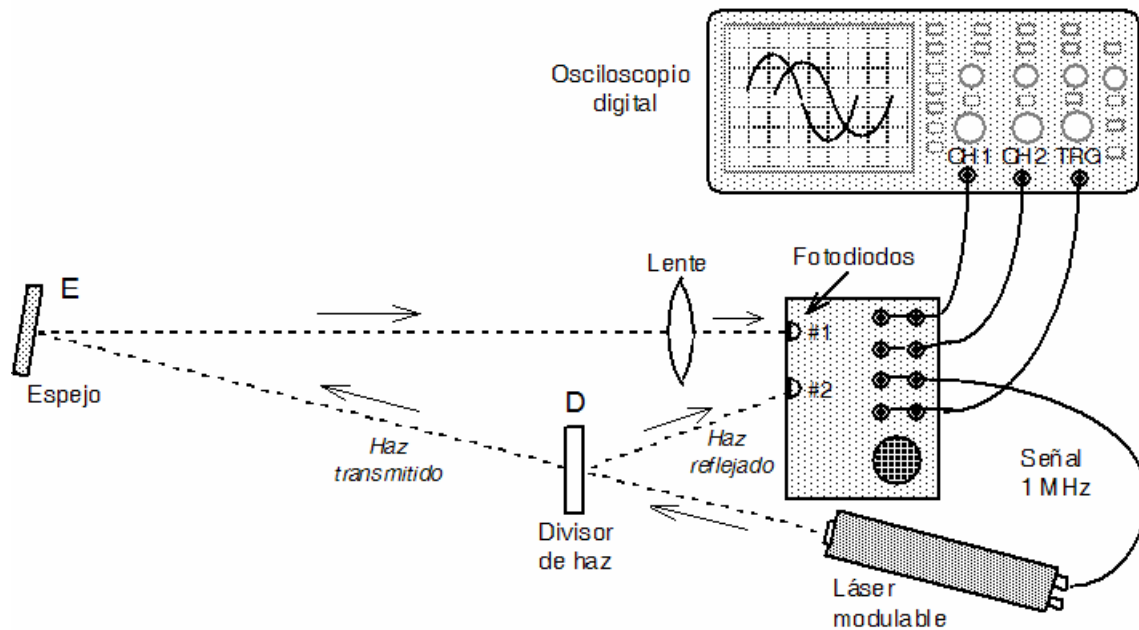
1. Láser modulable
2. Unidad con generador de 1 MHz y fotodetectores.
3. Lentes de enfoque.
4. Espejo.
5. Osciloscopio de dos canales con memoria.
6. Banco óptico.
7. Cinta métrica.

### **TEORIA**

La velocidad de la luz es una constante importante de la naturaleza. Uno de los primeros intentos de medir la velocidad de la luz fue efectuado por Galileo, quien usó una lámpara, un obturador y un espejo. El espejo estaba colocado en una colina, a una distancia considerable de la lámpara y el obturador. Galileo trató de determinar la velocidad de la luz midiendo el intervalo de tiempo entre la apertura del obturador para dar paso a la luz de la lámpara y su percepción de la luz reflejada por el espejo. Galileo concluyó que... "y si no es instantánea, es extremadamente rápida". En realidad es imposible medir la velocidad de la luz de esta manera ya que el tiempo de tránsito de la

luz es pequeño comparado con el tiempo de reacción de los observadores. Recordemos que en un segundo la luz podría dar siete y media vueltas alrededor de la Tierra. Las primeras mediciones de la velocidad de la luz se basan en mediciones astronómicas. La primera medición terrestre exitosa fue realizada por Fizeau en 1849, sobre una loma de París, en una versión refinada de la técnica Galileana usando como obturador una rueda dentada giratoria. Esta convertía un haz continuo en una serie de pulsos de luz y se ajustaba el sistema óptico para que durante el tiempo en que la luz iba y venía después de reflejarse en un espejo distante, la rueda había girado un número de rendijas. Conociendo la velocidad de rotación de la rueda y la distancia del espejo, Fizeau determinó el valor  $c = 3,1 \times 10^8$  m/s.

En este experimento mediremos la velocidad de la luz por un procedimiento extremadamente sencillo que aprovecha el hecho de que la luz de un láser puede ser modulada por una señal de radiofrecuencia.



**Figura 1:** Esquema experimental para la medición de la velocidad de la luz

El láser emite un haz altamente colimado y su potencia es modulada por una señal de radio-frecuencia a 1 MHz. Como se ilustra en la figura 1, el haz pasa por un divisor D que lo separa en dos: un haz que es transmitido y sigue directo hacia un espejo distante, E y el otro haz que se refleja. Los dos haces, el reflejado del divisor y el transmitido (reflejado del espejo E), después de viajar diferentes distancias inciden en diferentes diodos foto detectores. Las señales modificadoras a la frecuencia de 1 MHz son amplificadas y enviadas a un osciloscopio de dos canales. Midiendo con el osciloscopio el retraso temporal  $\Delta t$  de una señal con respecto a la otra y midiendo con una cinta métrica la diferencia de camino  $\Delta x$  de los dos haces, se determina la velocidad de la luz  $c$ :

$$c = \Delta x / \Delta t$$

---

## ACTIVIDADES PRELIMINARES

- a) Describa el principio de funcionamiento de un láser modulable.
- b) A partir de las leyes de Faraday y Ampere en forma integral, deduzca la relación para la velocidad de la luz en el vacío:

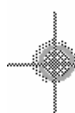
$$c = (\epsilon_0 \mu_0)^{-1/2}$$

---

## PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

Este experimento debe ser realizado en un recinto suficientemente espacioso (con al menos 20 m de distancia disponible) y requiere de la participación de por lo menos dos personas. El equipo con el láser debe ser instalado sobre una mesa firme.

*El experimento a ser realizado emplea un rayo láser de He-Ne como fuente de luz ( $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ ). Es muy importante que antes de empezar la práctica Uds. se familiaricen con los principios de operación y características de este dispositivo y, además, tomen conciencia de que la luz láser debe tratarse con el debido cuidado y precaución.*



**LUZ LASER  
EVITE EXPONER DIRECTAMENTE SUS OJOS**

---

*El láser puede producir lesiones en la retina, por lo tanto recomendamos:*

- 1) No mirar directamente hacia la ventanita del laser (aun si está apagado) .
- 2) No apuntar con la luz hacia los ojos de su compañero.
- 3) Usar una hoja de papel como pantalla, para ubicar los diferentes haces.

1. Coloque el espejo E inicialmente a una distancia de aproximadamente 15 m del banco óptico. Instale el divisor de haz aproximadamente a 50 cm del láser y apunte el haz en dirección hacia la posición del espejo.

2. Gire el divisor de haz cuidadosamente hasta que su haz reflejado incida sobre el fotodetector #2 en el módulo generador/detector.
3. Proceda a la alineación del espejo distante E hasta que el haz que se refleja de él incida sobre el fotodetector #1. Observe que este haz, luego de su viaje de ida y vuelta, llega considerablemente ensanchado.
4. Coloque la lente condensadora a una distancia aproximada de 8 cm del fotodetector y ajuste su posición para enfocar el haz. Podría ser necesario colocar una lente idéntica en el camino del haz proveniente del divisor de haz para mantener idénticas las condiciones de los dos haces.

*En este experimento se usa un osciloscopio digital en tiempo real que permite almacenar una señal un cierto número de veces y promediarla. Antes de realizar el experimento se recomienda leer el manual de instrucciones (ver Apéndice) y familiarizarse con los diferentes controles del osciloscopio.*

5. Con el láser apagado y el conmutador de audio en la posición OFF, proceda a hacer las siguientes conexiones:
  - a) La salida del fotodetector/amplificador #1 al canal 1 del osciloscopio.
  - b) La salida del fotodetector/amplificador #2 al canal 2 del osciloscopio.
  - c) La salida del oscilador de 1 MHz a la entrada de video del laser.
  - d) La salida de disparo (SYNC) del oscilador al EXT TRIG del osciloscopio.
6. Usando la escala de tiempos en el osciloscopio a  $\sim 250$  ns/div, deberían observarse dos señales sinusoidales de 1 MHz desfasadas. Haga los alineamientos necesarios del espejo, divisor de haz y lente hasta que los dos haces incidan propiamente en los agujeros de los fotodetectores y las dos señales en el osciloscopio tengan la mayor amplitud posible ( $\sim 2$  voltios pico-pico).
7. Para medir la diferencia de tiempo de vuelo,  $\Delta t$ , ajuste previamente las señales en el osciloscopio para que tengan amplitud semejante y mida la diferencia de tiempo entre las dos señales. Esto se logra con más precisión midiendo los puntos donde las ondas **cortan** el eje horizontal. Haga esta determinación varias veces en distintos puntos de las ondas. Obtenga el promedio de  $\Delta t$  y su desviación estándar. Calcule el error relativo porcentual de la medida de diferencia de tiempo de vuelo.

8. Con una cinta métrica, mida la diferencia de camino  $\Delta x$  entre los dos haces. Haga una estimación realista del error de la medida. Calcule el error relativo porcentual de la medida de diferencia de camino  $\Delta x$ .
9. Cambie la distancia del espejo al divisor de haz y repita los pasos anteriores para por obtener por lo menos cuatro distancias diferentes de  $\Delta x$  entre 15 m y 25 m.
10. Grafique los valores obtenidos  $\Delta x$  vs  $\Delta t$  y de la pendiente y obtenga la velocidad de la luz con su respectivo error.
11. ¿Cómo se compara el valor obtenido de la velocidad de la luz con el mejor valor aceptado  $c = 2,997\ 924\ 58 \times 10^8$  m/s?  
¿Se podrían justificar las discrepancias con la precisión de las medidas en este experimento? Identifique cualquier error sistemático que pudiera explicar tales discrepancias.

## **PREGUNTAS**

1. Describa dos otros métodos experimentales para medir la velocidad de la luz y señale las ventajas y desventajas en comparación con el método empleado en esta práctica.
2. Sabiendo que la luz tarda aproximadamente 8,5 minutos en viajar desde el Sol a la Tierra, determine la masa del sol.

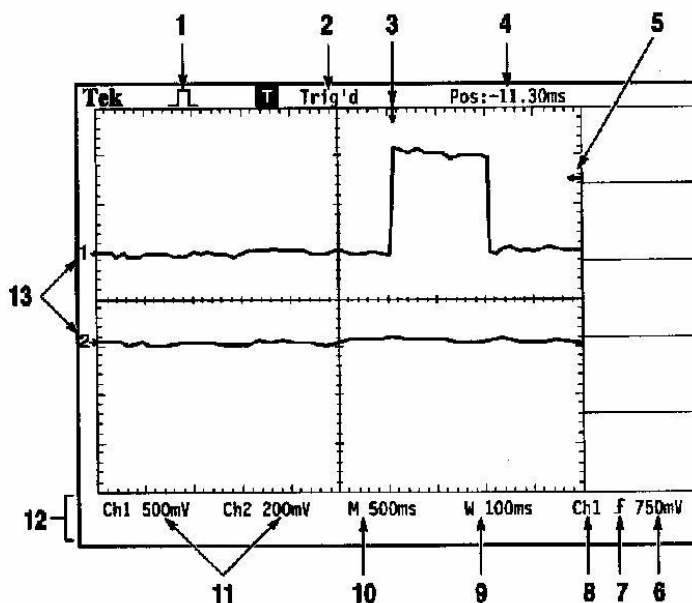
## **REFERENCIAS**

1. E. Hecht y A. Zajac, *Optica*, Fondo Educativo Interamericano, SA (1977).
2. T. Kallard, *Exploring Laser Light*, American Association of Physics Teachers (1977).
3. E. D. Greaves, An Michel Rodriguez, J. Ruiz-Camacho. A one-way speed of light experiment. *Am. J. Physics*, Vol **77** (2009) 194-196

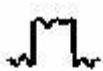


## PANTALLA

Además de la imagen de las ondas o señales la pantalla contiene muchos detalles de las ondas y de la posición de los controles del instrumento.



1.- Iconos que muestran el modo de adquisición.



Modo de muestreo



Modo de detección de pico



Modo de promedio

2.- Status del trigger. Muestra si hay una fuente adecuada de disparo o si se ha suspendido la adquisición.

3.- Marca que muestra la posición del trigger. Esta también indica la posición horizontal porque el control de Posición Horizontal realmente mueve horizontalmente la posición del trigger.

4.- Posición del trigger. Muestra la diferencia (en tiempo) entre el centro del retículo y la posición del trigger.  
Centro = cero

5.- La marca muestra el nivel del trigger.

6.- La lectura es el valor numérico del nivel del trigger

7.- El ícono muestra la pendiente seleccionada del trigger para disparo en el borde

- 8.- Muestra la fuente del trigger
- 9.- Muestra el rango de ajuste de tiempo en la pantalla
- 10.- Muestra la base de tiempo
- 11.- Muestra los factores de escala vertical para los canales 1 y 2
- 12.- Muestra mensajes en línea momentáneamente
- 13.- Los marcadores indican los niveles de tierra de referencia de las ondas mostradas

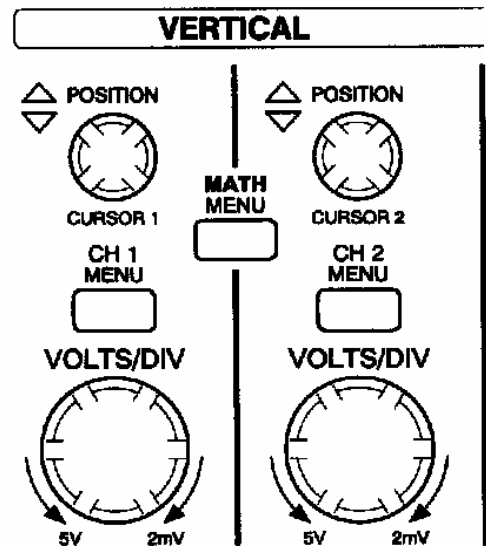
## CONTROLES VERTICALES

**CH1 Posición 1 del cursor.** Ajusta verticalmente la posición del cursor 1

**CH2 Posición 2 del cursor.** Ajusta verticalmente la posición 2 del cursor

**MATH MENU.** Muestra el menú de operaciones matemáticas

**CH1 y CH2 MENU.** Muestra la selección del canal de entrada y la interrumpe on y off

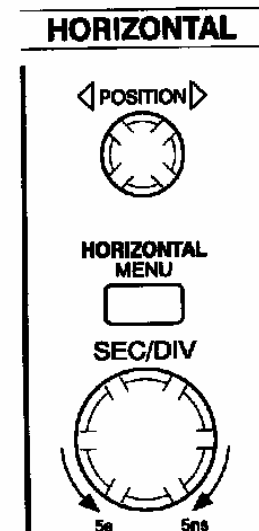


## CONTROLES HORIZONTALES

**POSICIÓN.** Ajusta la posición horizontal de los canales.

**MENU HORIZONTAL.** Muestra el menú horizontal.

**SEC / DIV.** Selecciona la escala horizontal de tiempo / división para la base de tiempo.



## CONTROLES DEL TRIGGER

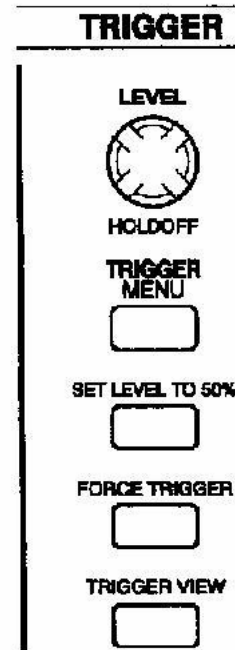
**LEVEL and HOLDOFF.** Este control tiene propósito doble definido en el menú horizontal. Como control del menú del trigger. Como control de pausa define el tiempo antes que se acepte otro evento de disparo. (Ver manual P.20)

**TRIGGER MENU.** Muestra el menú trigger

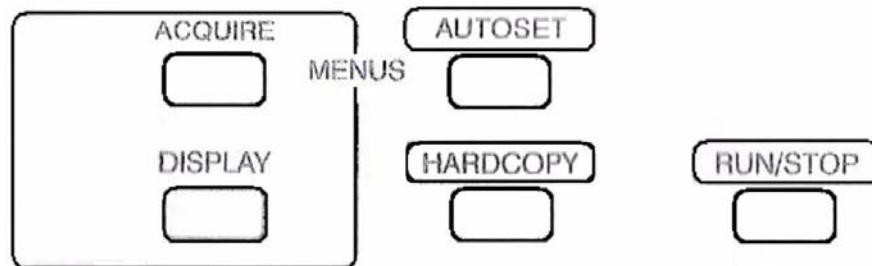
**SET LEVEL TO 50%.** El nivel del trigger se ajusta a 50% del menú de la señal

**FORCE TRIGGER.** Inicia una adquisición independiente de que la señal que disparo sea la adecuada.

**TRIGGER VIEW.** Mientras se mantiene pisado, se muestra en pantalla la señal del trigger, en lugar de mostrar la onda del canal.



## BOTONES DE CONTROL



**SAVE / RECALL.** Muestra el menú de guardar/sacar para ajustes y ondas.

**MEASURE.** Muestra el menú de medidas automáticas.

**ACQUIERE.** Muestra el menú de adquisición.

**DISPLAY.** Presenta el menú de tipos de presentación.

**CURSOR.** Muestra el menú del cursor el ajuste de posición vertical ajusta la posición del cursor mientras se ve el menú del cursor. El valor permanece en pantalla (a menos de apagarlo) después de dejar el menú de cursor pero no es ajustable.

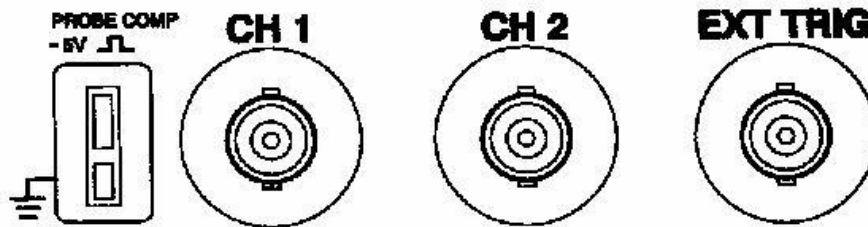
**UTILITY.** Muestra el menú de utilidades.

**AUTOSSET.** Automáticamente ajusta el instrumento para que produzca una imagen usable de la señal de entrada.

**HARDCOPY.** Inicia una operación de impresión.

**RUN / STOP.** Inicia y para adquisición de ondas.

## CONECTORES



**VOLTAJES DE PRUEBA DE SALIDA Y DE TIERRA.** Para ajustar las puntas de prueba.

**CH1 y CH2.** Conectores de entrada para canales 1 y 2

**EXT TRIG.** Conectores de entrada para una señal externa de trigger. Use el menú de trigger para seleccionar la fuente del trigger.

# PRACTICA DE LABORATORIO **III-03**

---

## *OPTICA GEOMÉTRICA I*

### **OBJETIVOS**

- Estudiar los fenómenos básicos de la óptica geométrica
- Verificar la ley de reflexión.
- Estudiar la ley de refracción.
- Determinar la condición crítica para la reflexión total interna.
- Medir el índice de refracción de diferentes materiales, sólidos y líquidos.

### **MATERIALES**

1. Banco óptico.
2. Plato rotatorio.
3. Base para el plato rotatorio.
4. Fuente luminosa.
5. Sistema colimador (placas de apertura variable, soportes, lente de rayos paralelos, placas de una rendija y de varias rendijas).
6. Fuente láser.
7. Espejo de rayos ópticos.
8. Lente cilíndrico.
9. Prisma truncado de lados paralelos.
10. Prismas equiláteros.

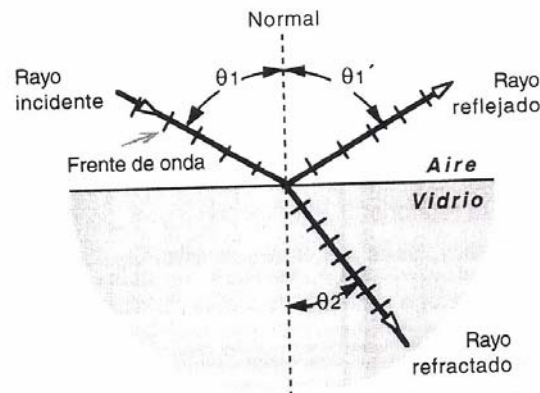
## TEORIA

### I. La óptica geométrica

A pesar del carácter ondulatorio que describe en general a la luz ya cualquier radiación electromagnética, la simplificación de representar aun frente de ondas por medio de un rayo en la dirección de propagación de las ondas, en muchos casos, resulta un modelo útil para interpretar la interacción de las ondas electromagnéticas con la materia. Esta aproximación es válida cuando las dimensiones de los objetos que interactúan con la luz (o cualquier otra radiación) son grandes en comparación con la longitud de onda de ésta. Bajo estas condiciones, podemos suponer que las ondas se desplazan en trayectorias rectas y utilizar la óptica geométrica para describirlas. La óptica geométrica estudia básicamente dos fenómenos: la refracción y la reflexión.

### II. Reflexión y refracción de la luz

Al incidir un rayo de luz sobre la interfaz que separa dos medios homogéneos, el haz se refleja de la superficie (el haz reflejado permanece en el medio original) y también se desvía (se refracta) al entrar en el segundo medio. Los ángulos de incidencia ( $\theta_1$ ), de reflexión ( $\theta_1'$ ) y de refracción ( $\theta_2$ ) se miden entre la normal a la superficie y el rayo respectivo (ver Fig. 1).



**Figura 1.** Reflexión y refracción de la luz entre dos medios homogéneos

La reflexión y la refracción están regidas por las siguientes leyes

- 1) Los rayos reflejado y refractado están en el plano formado por el rayo incidente y la normal a la superficie en el punto de incidencia.
- 2) La reflexión cumple la relación siguiente:

$$\theta_1 = \theta_1' \quad (1)$$

3) La refracción cumple la relación,

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = n_{21} \quad (2)$$

donde  $n_{21}$  representa el *índice de refracción* del medio 2 con respecto al medio 1 y no es más que la relación de las velocidades de la luz en los dos medios. Esto nos permite reescribir el índice de refracción  $n_{21}$  en términos de los índices de cada uno de los medios con respecto al vacío ( $n_1$  y  $n_2$ ):

$$n_{21} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{c/V_2}{c/V_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío. El índice de refracción del aire con respecto al vacío es  $1,00029$  y en la práctica se suele aproximar a la unidad. La relación (3) nos permite reescribir la ley de refracción de la siguiente manera:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (4)$$

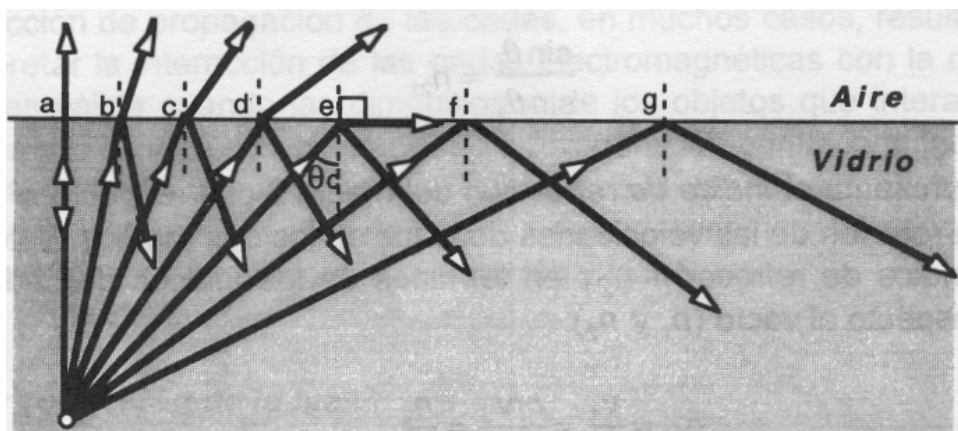
Ya que la velocidad de la luz en un medio depende de la longitud de onda de la luz, *el índice de refracción también exhibirá dependencia de la longitud de onda de la luz considerada:*

$$n(\lambda) = \frac{c}{V(\lambda)} \quad (5)$$

Al pasar la luz a un medio más denso, el rayo refractado se acerca a la normal. Por supuesto, al pasar la luz a un medio menos denso, el rayo reflejado se alejará de la normal y, debido precisamente a ello, en este último caso es posible encontrar que al aumentar el ángulo de incidencia se llega eventualmente a una configuración con un ángulo de incidencia crítico ( $\theta_1 = \theta_c$ ), para la cual el rayo refractado sale rasando la superficie (esto es, el ángulo de refracción es de  $90^\circ$ ):

$$\frac{\sin(\theta_c)}{\sin(\frac{\pi}{2})} = \sin(\theta_c) = n_{21} \quad (6)$$

Note que en este caso  $n_{21} < 1$  pues la densidad del medio 1 es mayor que la del medio 2. Para ángulos mayores que este *ángulo crítico* de incidencia, no hay rayo refractado, dando lugar a la llamada *reflexión total interna* (ver Fig. 2). Este fenómeno, en el cual se mantiene la luz dentro del medio más denso, es el principio de operación de las fibras ópticas.



**Figura 2.** Reflexión total interna

### III. Medios Refringentes

Un medio refringente es aquel medio homogéneo que nos permite cambiar la velocidad (y por tanto, también la dirección) de la luz. Un prisma es un medio refringente limitado por caras planas. Las lentes son medios refringentes limitados por caras convexas, cóncavas y/o planas.

Es posible determinar experimentalmente el índice de refracción de un prisma. Para ello consideremos un rayo de luz que incide desde el aire sobre una de las caras de un prisma equilátero (ver Fig. 3). El ángulo  $\theta$  de incidencia se escoge de suerte tal que el rayo emergente también forme un ángulo  $\theta$  con la normal de la otra cara.

Note que se verifican las relaciones  $\angle bad + \alpha = \pi/2$  y  $\angle bad + \phi/2 = \pi/2$  (el ángulo  $\phi$  se denomina ángulo de refringencia). Por lo tanto,

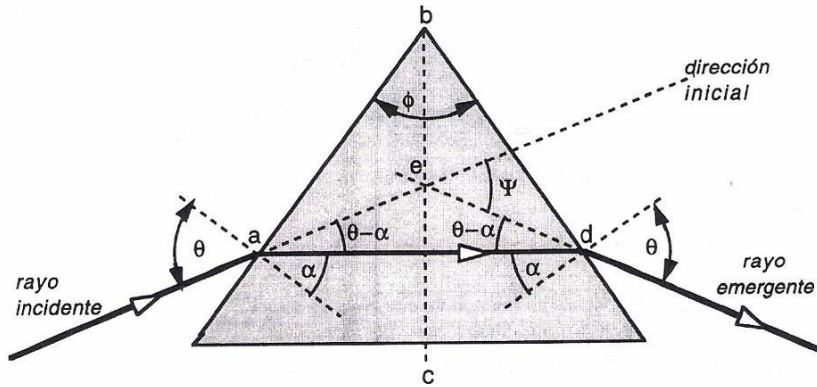
$$\alpha = \phi/2 \quad (7)$$

El ángulo de desviación  $\psi$  es la suma de los dos ángulos opuestos del triángulo aed :

$$\psi = 2(\theta - \alpha) \quad (8)$$

Eliminando  $\alpha$  entre las relaciones (7) y (8), se obtiene,

$$\theta = \frac{1}{2}(\psi + \phi) \quad (9)$$



**Figura 3.** Prisma equilátero en condición de desviación mínima. Note que el haz atraviesa el prisma de manera paralela a la base.

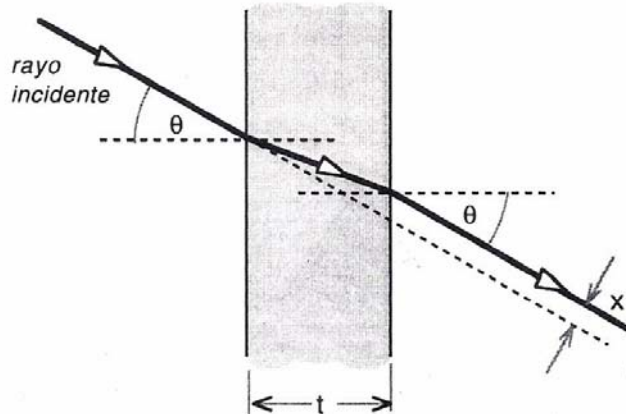
La primera refracción verifica la relación,

$$\text{sen } \phi = n \text{sen } \alpha \quad (10)$$

en la cual  $n$  es el índice de refracción del material con respecto al vacío. Se puede obtener la deseada expresión de  $n$  en función del ángulo de incidencia y del ángulo de refringencia si hacemos uso de las relaciones (7) , (9) y (10):

$$n = \frac{\text{sen} \frac{\psi + \phi}{2}}{\text{sen} \frac{\phi}{2}} = \frac{\text{sen } \phi}{\text{sen} \frac{\phi}{2}} \quad (11)$$

Esta expresión es válida únicamente para el caso en el cual  $\theta$  se escoge de modo que el rayo de luz atraviese simétricamente el prisma. En este caso  $\psi$  representa el *ángulo de desviación mínima*; se obtiene una desviación mayor si el ángulo  $\theta$  es incrementado o disminuido.



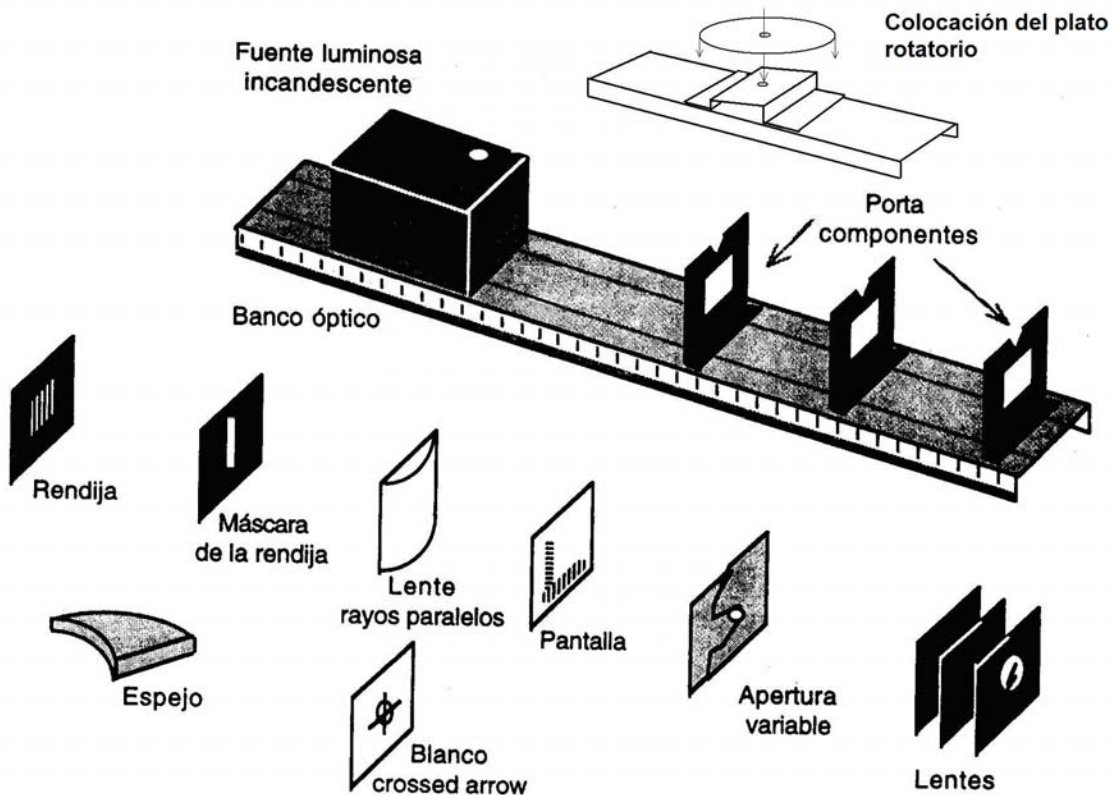
**Figura 4.** Medio refringente de caras paralelas.

## ACTIVIDADES PRELIMINARES

- a) Demuestre, para el caso de un paralelepípedo homogéneo (o prisma truncado de caras paralelas), que el ángulo con el cual emerge el haz es igual al ángulo con el cual incide.
- b) Demuestre la expresión general (para cualquier ángulo de incidencia) que da el desplazamiento  $x$  del haz emergente en el caso de superficies plano paralelas.

$$x = t \cdot \sin \theta \left( 1 - \frac{\cos \theta}{\sqrt{n_{21}^2 - \sin^2 \theta}} \right)$$

## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL



**Figura 5.** Elementos empleados en los montajes experimentales.

### A. Ley de reflexión

- A1. Coloque sobre el banco óptico la fuente luminosa, y, muy cerca de la fuente luminosa, el sistema colimador y el plato rotatorio en su base. El sistema colimador se utiliza

para minimizar la dispersión de la fuente y para formar un solo haz. En frente de la fuente se coloca la lente cilíndrica para producir rayos paralelos. Ajuste la distancia Lente –filamento de luz para que la fuente de luz esté en el foco de la lente y el haz de luz proyectado sea un haz paralelo. Luego y en una misma base la placa con múltiples rendijas y finalmente la placa de una rendija.

- A2.** Luego de formar un haz fino y colimado sobre el plato rotatorio, alinee el haz sobre el eje óptico, esto es, sobre la línea denominada *normal* en el plato. Disponga el espejo de rayos ópticos de manera perpendicular a la normal y en el centro del plato rotatorio. Esto se logra haciendo coincidir, sobre la normal, el haz reflejado con el incidente.
- A3.** Proceda a variar, a intervalos de  $5^\circ$ , el ángulo de incidencia y mida (con su respectivo error) el ángulo que forma, con la normal, el haz reflejado. Discuta a partir de estos resultados, la ley de reflexión.

## **B. Ley de refracción**

- B.1** Sustituya la fuente luminosa y el sistema colimador, por el láser. Coloque sobre el láser una lente convergente (Capuchón con lente) a fin de aumentar la divergencia del Láser. Coloque en frente, en una misma base, la placa de una rendija y la placa con el sistema de rendijas.



**LA LUZ DEL LASER NO DEBE SER VISTA DIRECTAMENTE,  
PUEDE CAUSAR DAÑO PERMANENTE EN LA RETINA**



**EL LASER ES UN INSTRUMENTO DELICADO. EVITE MOVERLO  
BRUSCAMENTE**

- B2.** Haciendo uso de la cuña de madera, incline el banco óptico hasta alinear el plato rotatorio con el haz del láser; procure, además, alinear el haz con la normal. Para aumentar la dispersión perpendicular al plato rotatorio, se coloca justo antes de éste la lente usada para producir rayos paralelos. El objeto de todo lo anterior es producir un haz colimado, plano que ilumine y atraviese toda la superficie del plato rotatorio.
- B3.** Coloque la lente cilíndrica sobre el plato rotatorio, con su lado plano enfrentando el láser, de manera que el haz incida perpendicularmente y por su centro. Asegúrese de

colocar el lado plano de la lente en el centro del plato rotatorio. En esta posición inicial, deben coincidir las direcciones de los rayos incidentes, reflejados y refractados.

- B4.** Proceda a variar el ángulo de incidencia en  $5^\circ$  y mida el ángulo que forma con la normal el rayo refractado.
- B5.** A partir de estos datos, determine el índice de refracción con su respectivo error, del material utilizado (plexiglás).
- B6.** Determine gráficamente el índice de refracción y compare con el obtenido en el apartado anterior

### ***C. Reflexión total interna***

- C1.** Coloque la lente-cilíndrica en el centro del plato de tal forma que la luz incida por la cara curva de la lente. Para que el haz reflejado internamente en la cara plana no se desvíe al salir de la lente, se debe asegurar que el haz pase justo por el centro de la lente. Verifique que el haz incida perpendicularmente sobre la cara plana y atravesando la lente desde el lado curvo.
- C2.** Proceda a variar el ángulo de incidencia hasta que el haz refractado en la cara plana no salga del material. Mida el ángulo crítico y, con éste, determine el índice de refracción  $n_{21}$  del aire con respecto al material (plexiglás) y del plexiglás con respecto al aire ( $n_{12}$ ) con sus correspondientes errores.

### ***D. Medios refringentes***

- D1. Prisma truncado de caras paralelas.** Coloque el prisma truncado con una de sus caras paralelas perpendicular al haz incidente (normal) y en el centro del plato rotatorio. Mida el desplazamiento lateral del haz emergente para ángulos de incidencia de  $30^\circ$  y  $60^\circ$ . Calcule, en cada caso, el índice de refracción.
- D2. Prisma equilátero.** Colocando una de las caras del prisma de plexiglás en el centro del plato rotatorio y perpendicular al haz del láser, proceda a aumentar el ángulo de incidencia hasta observar el haz emergente. Determine el ángulo de desviación mínima y, con éste, el índice de refracción del material. Para ello puede hacer uso de un papel sobre el plato rotatorio para marcar la dirección del haz incidente y el emergente.

La condición de mínima desviación se puede establecer proyectando el rayo emergente sobre una hoja de papel; al rotar en un mismo sentido el plato rotatorio (y por ende, el ángulo de incidencia,  $\theta$ ), la proyección del rayo emergente se desplazará disminuyendo la desviación hasta alcanzar un punto de mínima desviación, (al alcanzar la condición de desviación mínima), para luego desplazarse en sentido opuesto. Note que el plato rotatorio es girado en el mismo sentido durante todo el

proceso.

Repita todo el procedimiento para el prisma de vidrio, de agua y de glycerol.

**D3.** Construya una tabla, presentando el índice de refracción del plexiglás en las diferentes experiencias realizadas y discuta Haga lo mismo para los prismas de diferentes materiales utilizados.

**D4.** Repita la Sección C sustituyendo el láser por la fuente luminosa. Describa sus observaciones y explique las diferencias que se presentan con los resultados obtenidos con el láser.

### ***PREGUNTAS***

1. ¿Por qué se utiliza el láser y no la fuente luminosa a partir de la Sección B?
2. ¿Cuál es la diferencia entre la luz del láser y la de la fuente luminosa?
3. Explique el mecanismo de funcionamiento de un láser.

### ***REFERENCIAS***

1. D. Halliday, R. Resnick y K. Krane, Física, Vol. 2, Caps. 35, 36, 37, Editorial Continental (1995).
2. R. M. Eisberg y L. S. Lerner, Física, Vol. 2, Caps. 23, 24, 25, Mc Graw- Hill (1984).
3. R. A. Serway, Física, Tomo 2, Tercera edición, Caps. 30, 31, Mc Graw-Hill (1992).
4. P. A. Tipler, Física, Tomo 2, Segunda edición, Caps. 27, 28, 29, Editorial Reverté (1985).

---

## *POLARIZACIÓN DE LA LUZ*

### **OBJETIVOS**

- Verificar la ley de Malus.
- Determinar el ángulo de Brewster y el índice de refracción para distintas sustancias (vidrio, mica, celuloide, aluminio).
- Calcular la rotación específica de una sustancia ópticamente activa.
- Estudiar el fenómeno de doble refracción en calcita.
- 

### **MATERIALES**

1. Banco óptico.
2. Fuente de luz graduable.
3. Polarizadores con escala angular móvil y fija.
4. Polarizadores sin escala graduada.
5. Base rotatoria graduada.
6. Filtros de colores y base para colocarlos en el banco.
7. Celdas con solución acuosa.
8. Circuito con dispositivo sensible a la intensidad de luz.
9. Voltímetro.
10. Materiales diversos: placas de vidrio, pedazos de mica, plexiglás, celofán, aluminio, cristal de calcita.

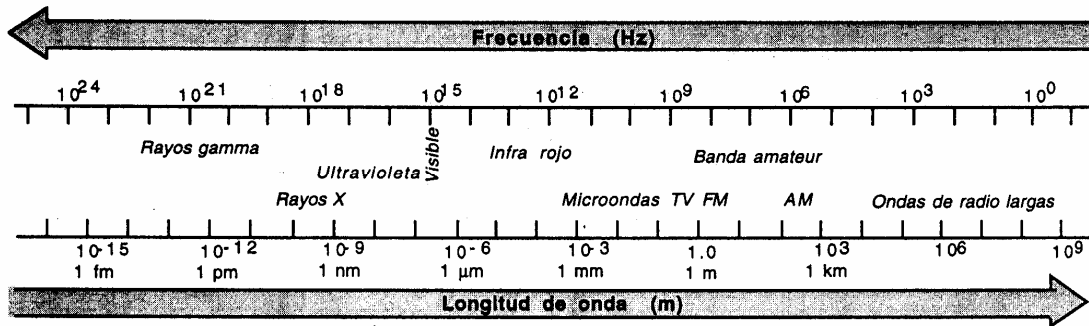
### **TEORIA**

#### ***I. Radiación electromagnética y luz***

La teoría electromagnética predice que cualquier partícula cargada que se acelera emite radiación electromagnética, propagada en el vacío a manera de onda con una velocidad universal  $c = 300.000 \text{ Km/seg}$ . Esta radiación o energía

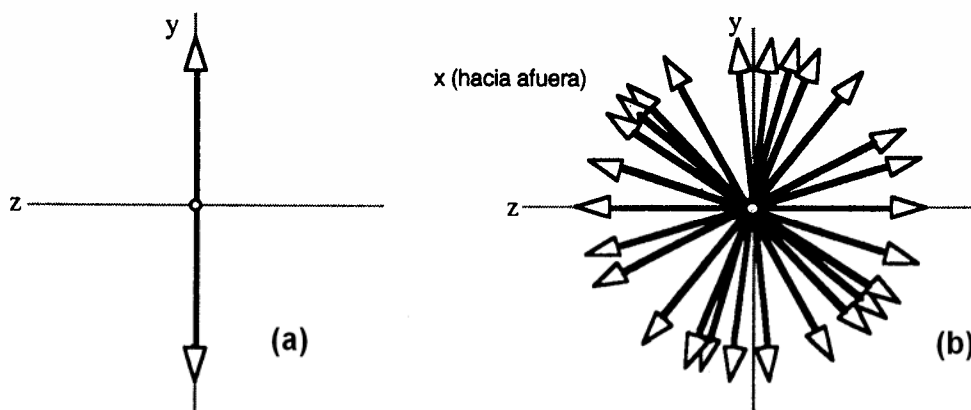
electromagnética está constituida por campos eléctricos y magnéticos oscilantes y acoplados de manera que están siempre en fase (ambos alcanzan simultáneamente valores máximos, mínimos, cero, etc.), son transversales (perpendiculares a la dirección de propagación) y perpendiculares entre sí.

El rango de las frecuencias posibles de oscilación de estos campos es muy amplio y constituye el espectro electromagnético que se muestra en la Figura 1.



**Figura 1.** El espectro electromagnético.

Una característica importante del campo eléctrico de la onda o pulso de radiación electromagnética es que está siempre orientado sobre el plano perpendicular a aquel que contiene la dirección de la aceleración de la partícula (que lo originó) y la dirección de propagación de la onda. Esta característica recibe el nombre de *polarización*. La Figura 2(a) representa los vectores campo eléctrico oscilante de la radiación emitida en la dirección *x* (saliendo del papel) por una partícula cargada que oscila a lo largo de una línea orientada en la dirección *y* vertical.



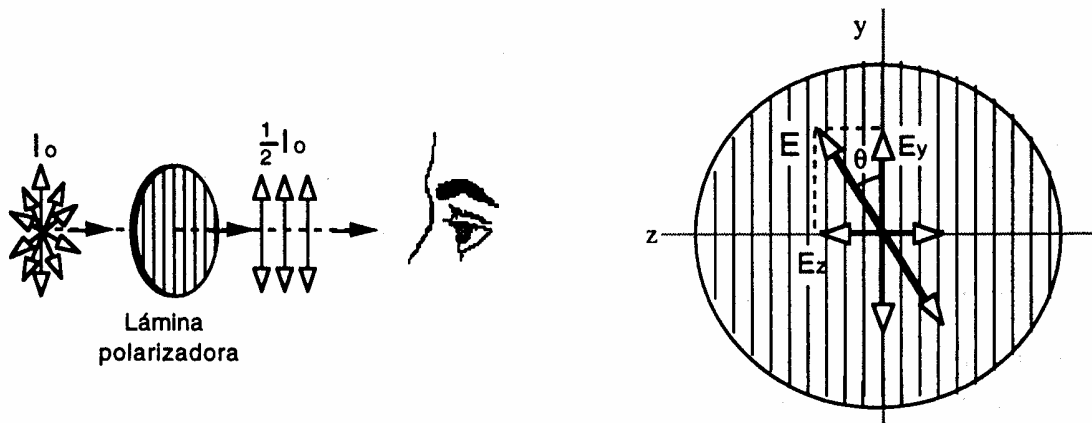
**Figura 2.** Luz polarizada vs luz no polarizada

Sin embargo, en la mayoría de las circunstancias la radiación electromagnética emitida por un grupo de átomos no está polarizada, La razón es que no existe una relación entre la orientación de la línea de oscilación de las cargas de un átomo y

la orientación de ésta línea en otro átomo, o sea, que no hay relación entre la dirección de polarización de la radiación emitida por un átomo y la dirección de polarización de la radiación emitida por otro, presentándose en este caso todas las polarizaciones posibles, por lo que no existe polarización neta. La Figura 2(b) muestra los vectores de campo eléctrico oscilante de radiación no polarizada emitida en la dirección

A continuación nos restringiremos a hablar de la radiación electromagnética en el rango visible, es decir, la luz.

La luz producida por una fuente ordinaria, por ejemplo, un bombillo, no está polarizada; sin embargo, puede polarizarse haciéndola incidir sobre ciertos materiales que tienen la propiedad de absorber una buena parte de la radiación electromagnética con el campo eléctrico oscilando paralelo a cierta dirección,  $x$ , mientras que son transparentes a la parte de la radiación con el campo eléctrico oscilando en dirección perpendicular a la anterior. Las láminas de material usado como polarizador se les llama comúnmente polaroid. En estas láminas existen ciertas direcciones características de polarización, mostradas por las líneas paralelas en la Figura 3.



10

**Figura 3.** Polarización de la Luz

El ojo no puede distinguir la luz polarizada de la luz normal. Examinando la luz producida por medio de un segundo polarizador (analizador) se puede determinar la dirección de polarización. Para esto se gira uno de los polarizadores respecto al otro de manera que si sus direcciones características de polarización están paralelas emergerá la máxima intensidad de luz, y si una de ellos gira  $90^\circ$  respecto a la condición anterior, habrá oscuridad a la salida del sistema.

La intensidad de luz que pasa a través de un polarizador ideal es la mitad de la incidente sin importar la orientación del polarizador. Para demostrar esto

recordemos que la intensidad de la luz,  $I$ , se obtiene al calcular el promedio de la magnitud del vector de Poynting,  $\mathbf{S}$  (el flujo de energía), sobre un ciclo de la onda electromagnética; de esta manera la intensidad se puede escribir en términos de una constante característica del medio de propagación y del cuadrado de la amplitud del campo eléctrico. Si la onda incidente está polarizada en un ángulo  $\theta$  con respecto al eje de transmisión, entonces la componente de  $E$  a lo largo del eje es  $E_P \equiv E_y = E_i \cos \theta$ . La intensidad de la onda está determinada por el vector de Poynting, esto es

$$I = \langle S \rangle = \langle E \times B \rangle / \mu_0 = E^2 / \mu_0 c \quad (1)$$

y la intensidad transmitida está dada por la ley de Malus (ecuación (2)).

Un polarizador real deja pasar menos del 50% de la intensidad incidente, debido a que absorbe y refleja una parte de la luz en la dirección de polarización.

## II. Ley de Malus

Si se tiene un sistema de dos polarizadores cuyas direcciones de polarización forman un ángulo  $\theta$ , y si llamamos  $I_i$  la intensidad de la luz que incide en el segundo polarizador, entonces la intensidad de luz emergente del segundo polarizador  $I_t$  puede escribirse como:

$$I_t = I_i \cos^2 \theta \quad (2)$$

Esta ecuación recibe el nombre de ley de Malus en honor a Etienne Malus, quién la descubrió experimentalmente en 1809.

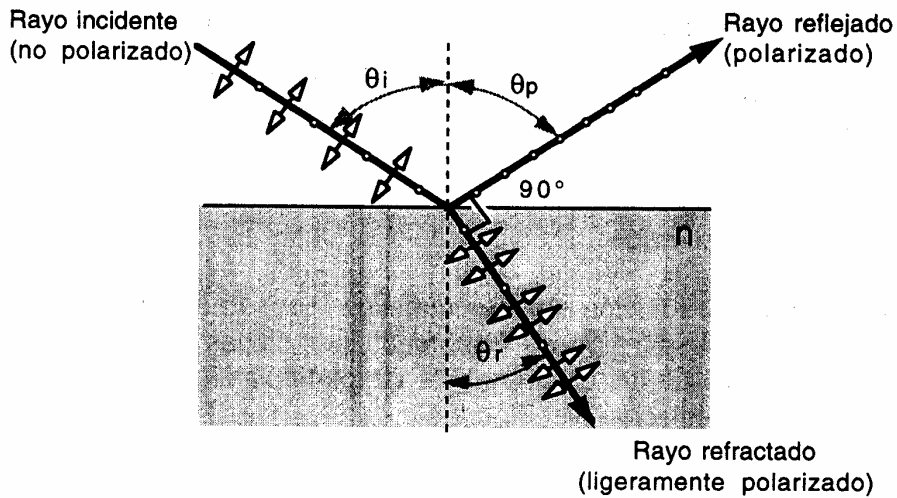
## III. Polarización por reflexión

En 1809, Etienne Malus descubrió que la luz puede ser parcialmente o totalmente polarizada por reflexión. En general, la luz reflejada es una mezcla compuesta de parte de luz no polarizada y parte de luz polarizada en una orientación específica. El grado de polarización depende de los índices de refracción en los dos lados de la superficie en donde la reflexión tiene lugar, así como el ángulo de incidencia de la luz

Cuando un rayo de luz incide con un ángulo  $\theta_i$  sobre una lámina reflectora, parte de la luz es reflejada a un ángulo  $\theta_p$  y parte es transmitida a un ángulo  $\theta_r$  (ver Figura 4). La relación entre estos ángulos es:

$$\theta_i = \theta_p \quad \text{y} \quad \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = n \quad (3)$$

donde  $n$  es el índice de refracción de la lámina.



**Figura 4.** Polarización por reflexión.

En el caso de materiales transparentes, cuando el ángulo de incidencia es tal que el rayo reflejado y el refractado son perpendiculares, el rayo reflejado está totalmente polarizado en una dirección perpendicular al plano de incidencia (formado por los rayos de incidencia, reflejado y la normal a la superficie), o, lo que es lo mismo, totalmente polarizado en dirección paralela a la superficie. En este caso se puede escribir:

$$\frac{\text{sen } \theta_i}{\text{cos } \theta_i} = n = \tan \theta_i = \tan \theta_p \quad (4)$$

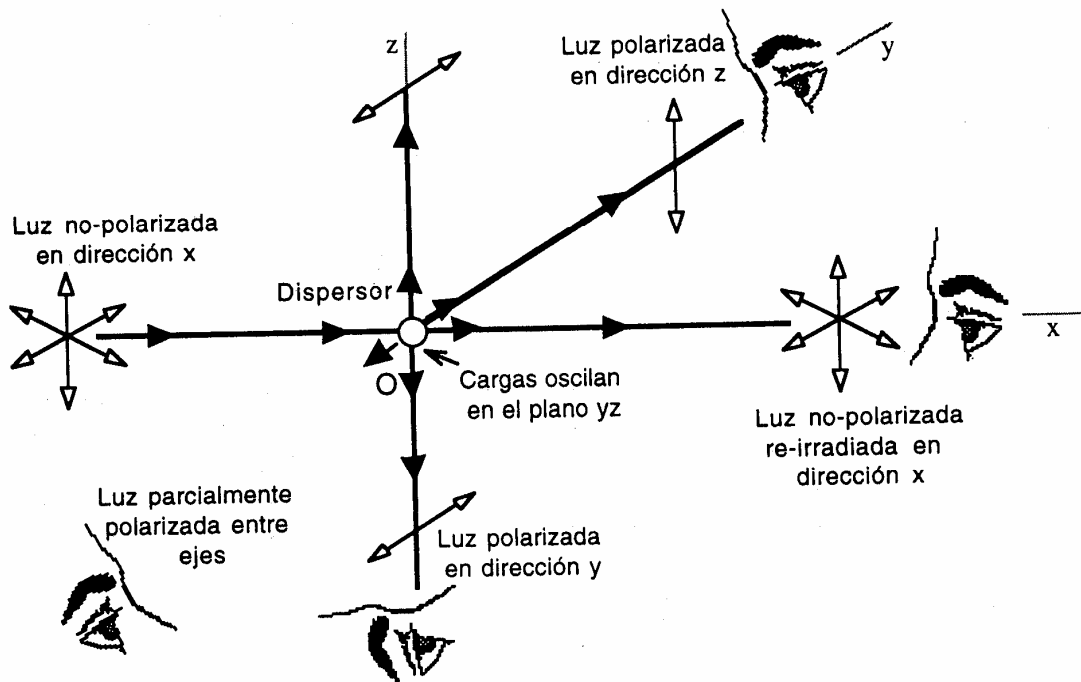
Esta relación es conocida como **ley de Brewster**, ya que fué descubierta experimentalmente por David Brewster, y el ángulo de incidencia  $\theta_i = \theta_p$  que cumple esta condición se le llama **ángulo de Brewster**.

Cuando un rayo de luz incide sobre una superficie con el ángulo de Brewster, toda la componente paralela al plano de incidencia es refractada, mientras que la componente perpendicular a dicho plano es parcialmente refractada y parcialmente reflejada. Como consecuencia de esto, el rayo transmitido estará parcialmente polarizado. Por medio de la transmisión a través de varias placas paralelas, las reflexiones sucesivas reducen progresivamente la magnitud de la componente perpendicular al plano de incidencia, de manera que, después de 10 ó 12 reflexiones, el rayo transmitido quedará también totalmente polarizado en la dirección paralela al plano de incidencia.

En conclusión, un grupo de placas de vidrio puede usarse como polarizador en dos formas distintas, dependiendo si se usa el rayo reflejado o el transmitido

#### IV. Polarización por dispersión

La luz, y en general la radiación electromagnética, cuando atraviesa un medio que contiene partículas en suspensión es dispersada por dichas partículas. Esto ocurre debido a las oscilaciones de los electrones de las partículas, generadas por el campo eléctrico oscilante de la radiación (ver Figura 5).



**Figura 5.** Polarización por dispersión.

Estos electrones comienzan a moverse en un plano perpendicular a la dirección de la radiación incidente, de manera que si se trata de luz no polarizada no habrá dirección preferencial para el movimiento de los electrones en este plano

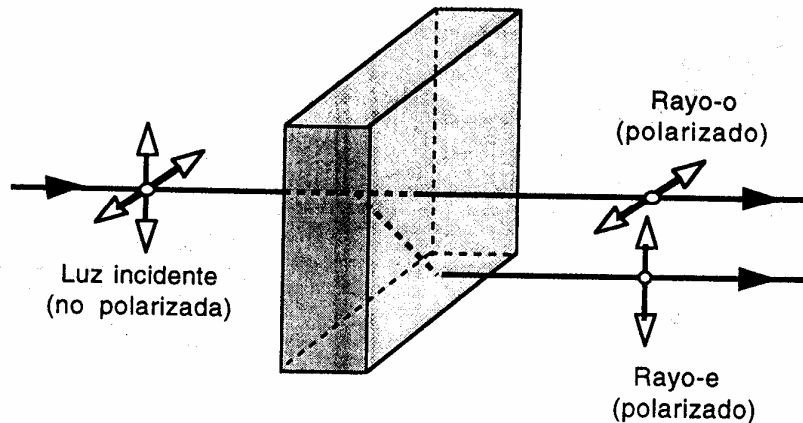
Sin embargo, un observador colocado en dirección perpendicular a la de incidencia original percibirá la radiación emitida por ese electrón solo en una dirección, la perpendicular a su dirección de observación, es decir, percibirá luz totalmente polarizada.

Para otras direcciones de observación la luz estará sólo parcialmente polarizada, y, si se observa directamente la luz en la misma dirección de incidencia al electrón, ésta aparecerá como no polarizada. Debido a este fenómeno es que el cielo se ve azul y que la luz recibida directamente del sol poniente se ve roja. La luz azul es la que en su mayor parte se dispersa más, ocasionando que la luz transmitida directamente tenga un componente de azul muy pequeño, por lo que luce roja. La polarización por dispersión permite mejorar las fotografías de

paisajes mediante el uso de filtros polarizadores en las cámaras con lo cual se logra aumentar el contraste con las nubes.

### V. Polarización por refracción doble o birrefringencia

Ciertos cristales como la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) exhiben el fenómeno conocido como doble refracción (ver Figura 6).



**Figura 6.** Polarización por refracción doble

En estos casos, para cualquier ángulo de incidencia dado, se producen dos rayos transmitidos, linealmente polarizados con sus planos de vibración perpendiculares entre sí.

Es de notar que de los dos rayos emergentes sólo uno de ellos ( $e_1$ , o rayo ordinario) cumple con la relación (3); es más, en general el que no cumple dicha relación ( $e_2$ , o rayo extraordinario) ni siquiera está en el plano de incidencia. Esto es debido a que el rayo  $e_1$  viaja en el cristal con la misma velocidad en cualquier dirección (el cristal es isotrópico para este rayo), mientras que el rayo  $e_2$  viaja en el cristal con una velocidad que varía con la dirección (el cristal es anisotrópico para este rayo). La dirección característica del cristal a lo largo de la cual la velocidad de propagación de los dos rayos es la misma se llama eje óptico.

### VI. Polarización circular

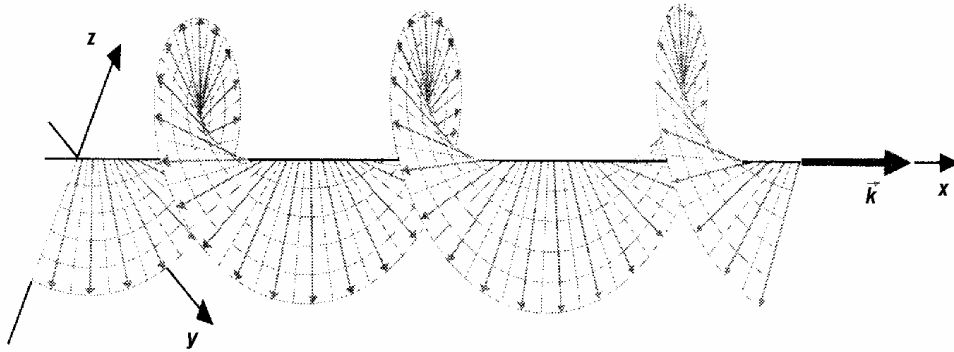
La combinación de dos ondas electromagnéticas de la misma frecuencia, linealmente polarizadas a ángulo recto una con respecto a la otra, de la misma amplitud y desfasadas  $90^\circ$ , dan como resultado una onda para la cual el campo eléctrico rota alrededor de la dirección de propagación con la misma frecuencia (ver Figura 7). Esta onda se dice que está circularmente polarizada. Es decir, tomando dos ondas cuyos campos eléctricos están en ángulo recto:

$$\vec{E}_1 = E_0 \hat{y} \cos(kx - \omega t) \quad \text{y} \quad \vec{E}_2 = E_0 \hat{z} \sin(kx - \omega t).$$

El campo resultante es:

$$\vec{E} = E_0(\hat{y} \cos(kx - \omega t) + \hat{z} \sin(kx - \omega t))$$

cuyo lugar geométrico es una hélice en la dirección  $\hat{k}$ .



**Figura 7.** Onda polarizada circularmente en que el vector campo eléctrico rota alrededor del eje de propagación.

## VII. Sustancias ópticamente activas

El paso de luz monocromática linealmente polarizada a través de sustancias ópticamente activas produce una rotación del vector eléctrico  $\vec{E}$  (igualmente para  $\vec{B}$ ), de tal manera que a la salida el plano de oscilación aparece rotado un cierto ángulo. Esto ocurre en ciertas sustancias las cuales se denominan ópticamente activas (azúcar, cuarzo) en virtud de la estructura asimétrica de sus moléculas o de la estructura cristalina con la disposición en forma de hélice de sus iones y moléculas. Dicha rotación puede describirse, en un material ópticamente activo, mediante la propagación de dos ondas polarizadas circularmente viajando en sentidos opuestos con velocidades  $v_r$  y  $v_l$  (doble refracción). Aquí tenemos que  $n_r(\text{derecha}) = c/v_r$  y  $n_l(\text{izquierda}) = c/v_l$ , son los índices de refracción para la onda circularmente polarizada que viaja hacia la derecha como para la izquierda. Si  $d$  es el espesor de la muestra y  $\lambda$  la longitud de onda de la fuente se encuentra que el giro  $\alpha$  es:

$$\frac{\alpha}{180^\circ} = \frac{(n_d - n_i)d}{\lambda}$$

El cociente  $\alpha/d$  se denomina poder de rotación.

En general, en el caso de un sólido la rotación depende de la sustancia, del grosor de la muestra  $L$  y de la longitud de onda de la luz empleada. En el caso de una solución, el ángulo de rotación depende adicionalmente de la concentración  $C$  de la solución, pudiendo expresarse la rotación  $\alpha$ , como:

$$\alpha = k_{\lambda}LC \quad (5)$$

donde  $k_{\lambda}$  es una constante denominada rotación específica del soluto para la longitud de onda  $\lambda$ .

La determinación del ángulo de rotación de la polarización tiene muchas aplicaciones prácticas. Entre éstas se pueden mencionar la identificación de minerales, de aminoácidos, y la determinación de concentraciones de azúcares. Para estas aplicaciones se hace uso de instrumentos especiales llamados polarímetros, así como tablas con valores previamente medidos del ángulo de rotación para ciertas longitudes de onda (en función de la concentración en el caso de soluciones).

## **ACTIVIDADES PRELIMINARES**

- a) Demuestre la ley de Brewster.
- b) Demuestre la ley de Malus.

## **PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

### **A. Comprobación experimental de la ley de Malus.**

En esta primera parte Ud. tratará de verificar la ley de Malus, es decir, la relación (2):  $I_t = I_i \cos^2 \theta$ . Sin embargo, debido a que los polarizadores no son perfectos, la intensidad de la luz no es cero cuando el ángulo entre los dos polarizadores es  $90^\circ$ , por lo que a la expresión anterior debe añadirse un término independiente con el fin de lograr una mejor descripción del fenómeno.

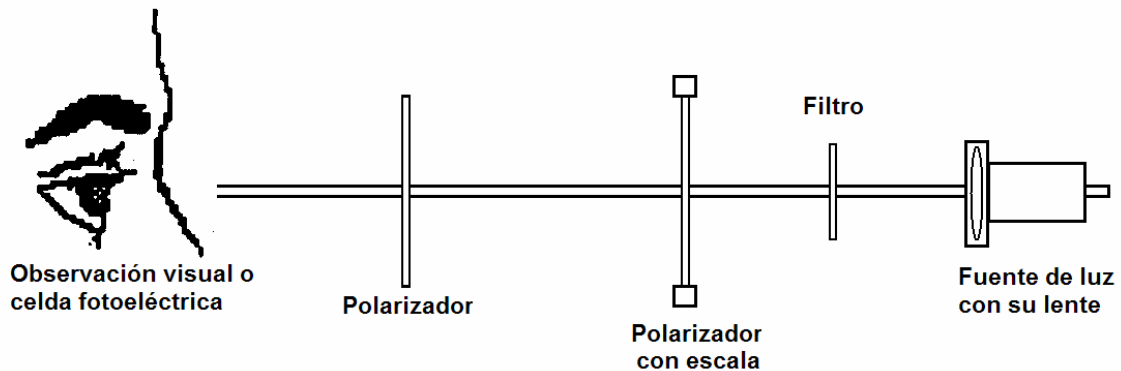
En la práctica se verificará esta ley midiendo la intensidad de la luz transmitida usando como detector un dispositivo cuya resistencia es sensible a la intensidad de luz incidente. Este dispositivo está conectado en un circuito con una batería y una resistencia. a través de la cual se conecta un voltímetro en paralelo. La diferencia de potencial observada debería ser directamente proporcional a la intensidad de luz incidente. El ángulo entre las direcciones de polarización deberá variarse entre  $0$  y  $180^\circ$ . Con los datos obtenidos y un gráfico apropiado de los datos experimentales se deberá comprobar la ley.

El procedimiento a seguir en esta parte se especifica a continuación:

- A1.-** En el banco óptico alinee la fuente de luz, dos polarizadores con escala angular, una lente y el circuito con el fotodiodo. (Ver figura 8). Omitir el filtro

para esta parte.

- A2.-** Coloque los dos polarizadores paralelos. Para esto observe la lectura del voltímetro, la cual debe hacerse máxima cuando se alcanza esta condición y mínima cuando los polarizadores están cruzados (las dos direcciones de polarización son perpendiculares).



**Figura 8.** Montaje para la parte A y C.

- A3.-** Ajuste la intensidad de la luz y la sensibilidad del voltímetro hasta obtener máxima variación de la intensidad al cambiar el ángulo del segundo polarizador. (EL fototransistor utilizado como sensor de luz solo es lineal en un cierto rango de intensidad de la luz)
- A4.-** Haga una tabla de los valores de la diferencia de potencial observada al variar el ángulo  $\Theta$ . Elabore el gráfico pertinente. Haga medidas en el rango  $0-360^\circ$  en intervalos de cada 5 grados.

## **B. Medida del índice de refracción mediante el fenómeno de polarización por reflexión.**

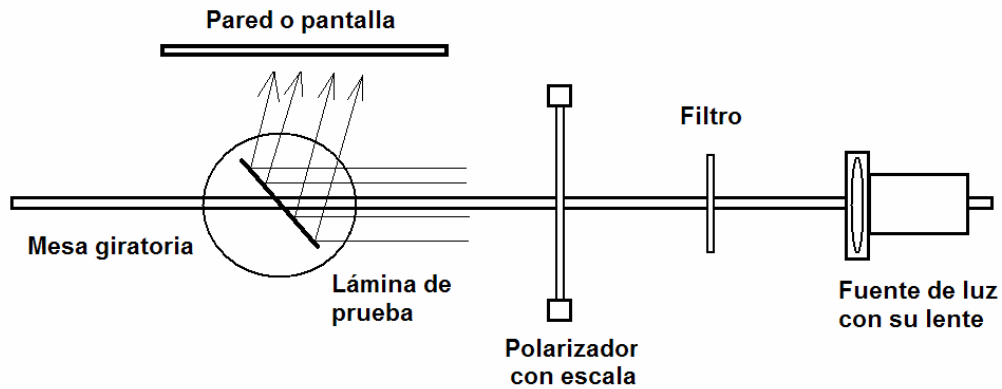
En esta experiencia se medirá el índice de refracción de algunos materiales determinando su **ángulo de Brewster** característico. Para esto se hará incidir en la lámina del material a estudiar luz polarizada en dirección perpendicular a la superficie de incidencia. Se rotará la lámina hasta que, al alcanzar la condición de reflexión dada por el ángulo de Brewster, se obtenga mínima intensidad en el ángulo reflejado.

El procedimiento experimental será el siguiente:

- B1.-** Proceda a alinear en el banco óptico la fuente de luz, la lente y la mesa giratoria con una de las láminas. Coloque primero la lámina perpendicular al haz, asegúrese de que para esta posición se mida **cero grados** en la

escala graduada de la mesa giratoria. (Ver figura 9)

**B2.-** Empiece a rotar la base giratoria y observe la imagen de la fuente de luz originada por el rayo reflejado proyectado en la pantalla o la pared. Coloque el polarizador entre la lente y la mesa rotatoria. Para cierto ángulo de incidencia y cierta dirección de polarización, deberá lograr una condición para la cual la intensidad de la imagen reflejada es prácticamente nula; tome la lectura del ángulo rotado de la mesa giratoria para esa condición. Repita varias veces esta medida para la misma lámina, calcule el valor promedio y la desviación estándar. Adicionalmente puede observar la lectura del detector con el fin de describir lo que le ocurre a la intensidad del haz transmitido cuando se acerca o aleja de la condición estudiada.



**Figura 9.** Montaje para la parte B.

**B3.-** Con los datos obtenidos para las muestras suministradas calcule sus índices de refracción. Indique los errores con los que está determinando cada  $n$ .

**B4.-** Compare los valores obtenidos con los reportados en la literatura.

### **C. Medida del ángulo de rotación de la polarización en sustancias ópticamente activas.**

En esta experiencia se medirá el ángulo de rotación de la polarización por una solución saturada de sucrosa o sacarosa para luz de cierta longitud de onda. Mediante los datos obtenidos se determinará la rotación específica de la solución.

Procedimiento a seguir:

**C1.-** Alinee en el banco óptico la fuente de luz, un filtro, un polarizador con escala, una celda con solución de azúcar y un segundo polarizador (analizador) con escala móvil (Ver figura 8). Las celdas con la solución se colocan entre los dos polarizadores.

**C2.-** Retirando la celda con solución de azúcar, oriente el analizador de manera de observar la **mínima** intensidad. Trabaje con luz polarizada en dirección vertical (es decir, perpendicular al plano de la mesa, y haga las observaciones **visualmente** (sin utilizar la celda fotoeléctrica).

**C3.-** Introduzca la celda con solución entre los polarizadores y rote el analizador hasta observar de nuevo la posición de mínima intensidad; anote la rotación requerida para alcanzar el mínimo.

**C4.-** Mida el ángulo de rotación para una, dos y tres celdas en línea. Grafique el ángulo de rotación versus el grosor de la muestra y determine a partir del gráfico el producto  $K_{\lambda}C$ .

**C5.-** Repita los pasos 2, 3 y 4 cambiando el filtro de luz.

**C6.-** Retire las celdas con solución de azúcar y coloque **entre los polarizadores cruzados** (mínimo de intensidad) trozos de plástico, mica, vidrio y celofán. Rote el analizador mientras observa la luz transmitida a través del sistema. Anote sus observaciones y explique el origen de los colores observados.

**C7.-** Coloque entre los polarizadores cruzados el pedazo de plexiglás en forma de U. Observe el efecto de doblar o comprimir el plástico. Anote sus observaciones y explíquelas.

#### **D. Polarización por refracción doble**

En esta experiencia se observará el fenómeno de doble refracción y se determinará la orientación de la polarización del rayo ordinario y extraordinario.

El procedimiento a seguir será el siguiente:

**D1.-** Marque un punto (pequeño y oscuro) en una hoja de papel blanco y coloque encima el cristal de calcita.

**D2.-** Rote el cristal y observe el resultado. Identifique el rayo ordinario y extraordinario.

**D3.-** Con un polarizador analice la luz emergente del cristal. Explique sus observaciones.

#### **PREGUNTAS**

1. ¿Por qué en el experimento acerca de la comprobación de la ley de Brewster se

trabaja con luz polarizada y por qué se escoge esa dirección de polarización?

2. ¿Puede usarse un polarizador para distinguir entre luz no polarizada y luz circularmente polarizada? Justifique.

### ***Polarización de la luz III -04 .12***

3. Cuando se observa el cielo despejado a través de un polarizador se encuentra que la intensidad varía al rotar el polarizador, esto no sucede cuando se observa una nube a través del polarizador, ¿por qué?

### **REFERENCIAS**

1. D. Halliday, R. Resnick y K. Krane, *Física*, Vol. 2, Caps. 40 y 48, Edit. John Wiley & Sons, Inc. (1992).
2. R. Eisberg y L. Lerner, *Física, Fundamentos y Aplicaciones*, Vol. 2, Caps. 27 y 28 Edit. Mc Graw-Hill Latinamerican (1984).
3. E. Hech y A. Zajac, *Optics*, Cap. 8, Edit. Addison Wesley Publishing Company (1974).
4. F. Mason, "Optical Activity and Molecular Dosimetry", *Contemp. Phys.*: 9, 239 (1968).



## *INDUCCION ELECTROMAGNETICA (Corriente AC)*

### **OBJETIVOS**

- Estudiar el fenómeno de inducción electromagnética.
- Medir campos magnéticos mediante una bobina de exploración.
- Estudiar la variación del campo magnético en el eje de un solenoide.
- Determinar las características desconocidas de una bobina.

### **MATERIALES**

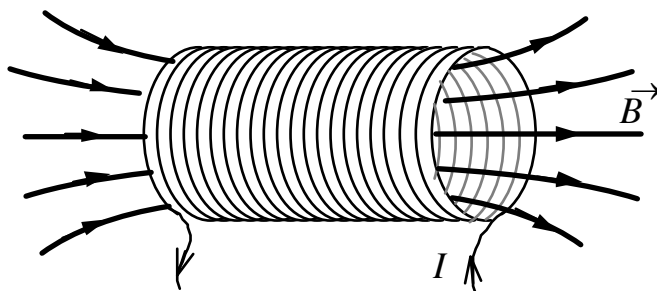
1. Solenoide de calibración.
2. Solenoide de características desconocidas.
3. Bobina exploradora.
4. Soporte para guiar la bobina exploradora.
5. Voltímetro AC.
6. Amperímetro AC.
7. Fuente de poder AC-DC.
8. Reóstato.
9. Conmutadores.
10. Cables de conexión.

### **TEORIA**

El campo magnético que produce un alambre conductor depende de la geometría del alambre, de la corriente que circula por él y de la ubicación del punto donde se desea determinar el campo. Para geometrías sencillas podemos hallar expresiones teóricas para el campo magnético, aplicando la ley de Ampère o la ley de Biot -Savart.

## A) Campo magnético de un solenoide

El solenoide es un tipo de configuración que tiene muchas aplicaciones prácticas y consiste de un alambre largo devanado en forma de hélice con espiras estrechamente espaciadas, como muestra la figura 1:

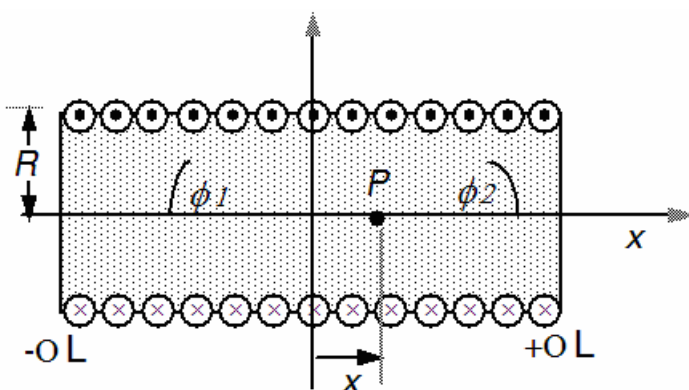


**Fig. 1:** Campo magnético de un solenoide

Para calcular el campo magnético producido en el eje de un solenoide, usamos la ley de Biot-Savart. Si la corriente que circula es  $i$  (*amperes*), el radio del solenoide es  $R$  (*metros*), su longitud es  $L$  (*metros*) y el número de vueltas es  $N$ , el campo magnético en *un punto del eje* está en la dirección de dicho eje y su magnitud está dada por la expresión:

$$B = \frac{\mu_0 Ni}{2L} [\cos\phi_1 + \cos\phi_2] \quad (\text{Tesla}) \quad (1)$$

donde los ángulos  $\phi_1$  y  $\phi_2$  son los que forman las líneas desde el punto en el eje a los extremos con el eje del solenoide, como indica la figura 2.



**Fig. 2:** Solenoide finito

La constante  $\mu_0$  tiene un valor de  $4\pi \times 10^{-7}$  T·m/A y se denomina constante de permeabilidad magnética.

Si el *solenoides* es muy largo ( $L \gg R$ ), podemos usar la aproximación  $\phi_1 \approx \phi_2 \approx 0$ , y el campo magnético es:

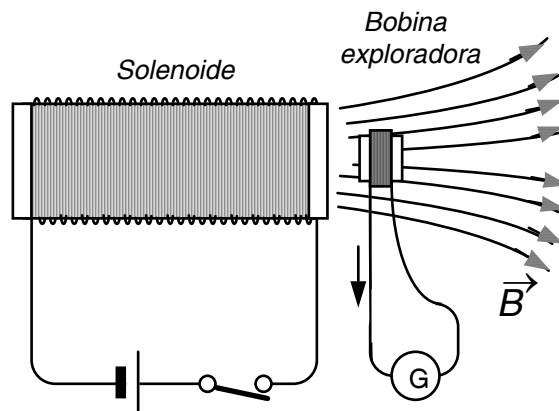
$$B \approx \frac{\mu_0 NI}{L} \quad \text{solenoides largo} \quad (2)$$

Esta expresión también podría haberse obtenido directamente usando la ley de Ampère, en vista de la uniformidad de  $B$  y de la simetría que presenta.

En este experimento usaremos solenoides que no son suficientemente largos como para considerar que la anterior expresión sea una buena aproximación. Por lo tanto usaremos la expresión (1) la cual es exacta y se cumple para *cualquier punto ubicado en el eje del solenoide*. De acuerdo a esta expresión  $B$  tiene un máximo en el centro del solenoide y decrece monótonicamente con la distancia.

## B) Inducción electromagnética

Para determinar el campo magnético experimentalmente haremos uso de una bobina exploradora, la cual es una bobina pequeña que puede ser colocada en diferentes posiciones en el campo magnético establecido.



**Fig. 3A:** Inducción de fem en una bobina exploradora

Si  $A_2$  es el área de la bobina exploradora, el flujo que la atraviesa es  $\Phi = BA_2 \cos\theta$ , donde  $\theta$  es el ángulo que forma su eje con la dirección del campo magnético. Cuando se produce una variación del campo magnético se induce una fem en la bobina, la cual, de acuerdo a la ley de Faraday, es igual a tasa de variación temporal del flujo magnético:

$$\text{fem} = -N_2 \left( \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right) = -N_2 A_2 \cos\theta \left( \frac{\Delta B}{\Delta t} \right) \quad (3)$$

Donde  $N_2$  es el número de vueltas de la bobina exploradora. Por lo tanto, la fem dependerá tanto de la variación temporal de  $B$  como también de las características propias de la bobina (área, número de vueltas) y de su orientación relativa al campo magnético.

Si se cierra el circuito de la bobina exploradora mediante una resistencia, circulará una corriente que es proporcional a esta fem. En este experimento mediremos campos magnéticos indirectamente por la corriente que induce en la bobina exploradora, una variación del flujo magnético. Esta corriente es detectada por el voltaje que se produce a través de una resistencia colocada entre los extremos de la bobina.

Si en la figura 3A se substituye la pila indicada por una fuente de corriente alterna habrá en el solenoide una corriente variable que produce en el interior del solenoide un campo magnético variable. Ver la figura 3B. En este caso en la bobina exploradora hay una variación de flujo permanente el cual induce una diferencia de potencial variable entre los extremos de la bobina exploradora.

Supongamos que se coloca la bobina exploradora en el *centro del solenoide de calibración*. De acuerdo a la expresión (1), para ese punto central ( $\phi_1 = \phi_2$ ) y el campo magnético viene dado por:

$$B_{\text{centro}} = \frac{\mu_0 NI}{2\sqrt{R^2 + (L/2)^2}} \quad (4)$$

donde N es el número total de vueltas, L (metros) la longitud y R (metros) el radio del solenoide, respectivamente. Estos son parámetros conocidos de la bobina de calibración. Si hacemos circular una corriente I (amperes) podemos calcular el campo magnético B (Tesla) mediante esta expresión.

Si la fuente de suministro es una fuente de corriente alterna, la intensidad I en la relación (4) será de la siguiente forma:

$$I = I_0 \text{ Sen } (\omega t + \delta)$$

Donde  $I_0$  es la amplitud de la corriente o corriente máxima,  $\omega$  es la frecuencia angular, t el tiempo y  $\delta$  un ángulo de fase. En este caso el campo magnético B en el interior del solenoide será una función sinusoidal del tiempo con la misma frecuencia angular y la misma fase.:  $B(t) = B_0 \text{ Sen } (\omega t + \delta)$ . Con  $B_0$  el valor máximo del campo magnético. En este caso la expresión (4) toma la forma siguiente:

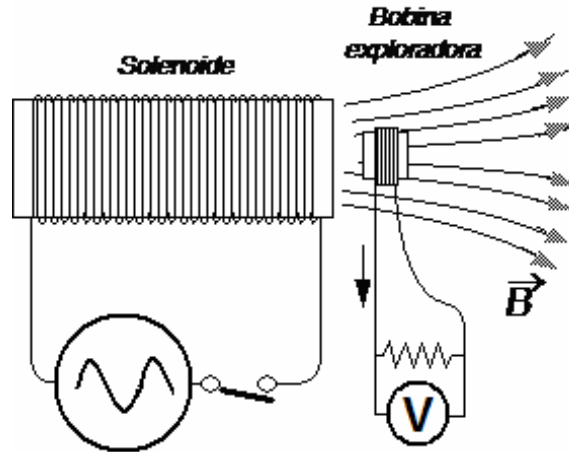
$$B(t) = B_0 \text{ Sen } (\omega t + \delta) = \frac{\mu_0 N I_0 \text{ Sen } (\omega t + \delta)}{2\sqrt{R^2 + (L/2)^2}} \quad (5)$$

El campo magnético variable B(t) induce en la bobina exploradora una corriente variable y esta produce en la resistencia un potencial variable V(t). Conectando a la resistencia un voltímetro AC este registrará un valor de voltaje que es el valor promedio  $V_{\text{RMS}}$  (Voltaje Root Mean Square ó voltaje medio cuadrático).

Una relación empírica entre la indicación del voltímetro  $V_{\text{rms}}$  y el campo magnético en el centro del solenoide es la siguiente:

$$B = C V_{\text{RMS}} \quad (6)$$

Donde C es una constante de calibración del sistema. (Las unidades de C son Tesla / Volts) Esta constante relaciona el campo magnético del solenoide con el valor de voltaje medido en la bobina exploradora. Una vez determinando el valor de esta constante C de calibración, podemos utilizar la bobina exploradora para determinar el valor del campo magnético a lo largo del eje del Solenoide.



**Fig. 3B:** Inducción de fem en una bobina exploradora con una fuente de corriente alterna

---

## ACTIVIDADES PRELIMINARES

### Demuestre la expresión para el campo magnético en el eje de un solenoide

Sea un solenoide de radio  $R$ , longitud total  $L$  y número de vueltas  $N$ . Su eje coincide con el eje  $x$ , y uno de sus extremos se encuentra en  $x = -OL$  y el otro en  $x = +OL$ . Si por el solenoide circula una corriente  $I$ , demuestre que el campo magnético  $B$  en cualquier punto del eje  $x$  viene dado por:

$$B = \frac{\mu_0 N I}{2L} [\cos\phi_1 + \cos\phi_2] \quad (7)$$

en donde los ángulos están especificados en la Figura 2:

$$\cos\phi_1 = \frac{(\frac{L}{2} + x)}{\sqrt{R^2 + (\frac{L}{2} + x)^2}}; \quad \cos\phi_2 = \frac{(\frac{L}{2} - x)}{\sqrt{R^2 + (\frac{L}{2} - x)^2}}$$

Observe que para los puntos en el exterior del solenoide,  $\cos\phi_2$  es negativo (para  $x$  positivo).

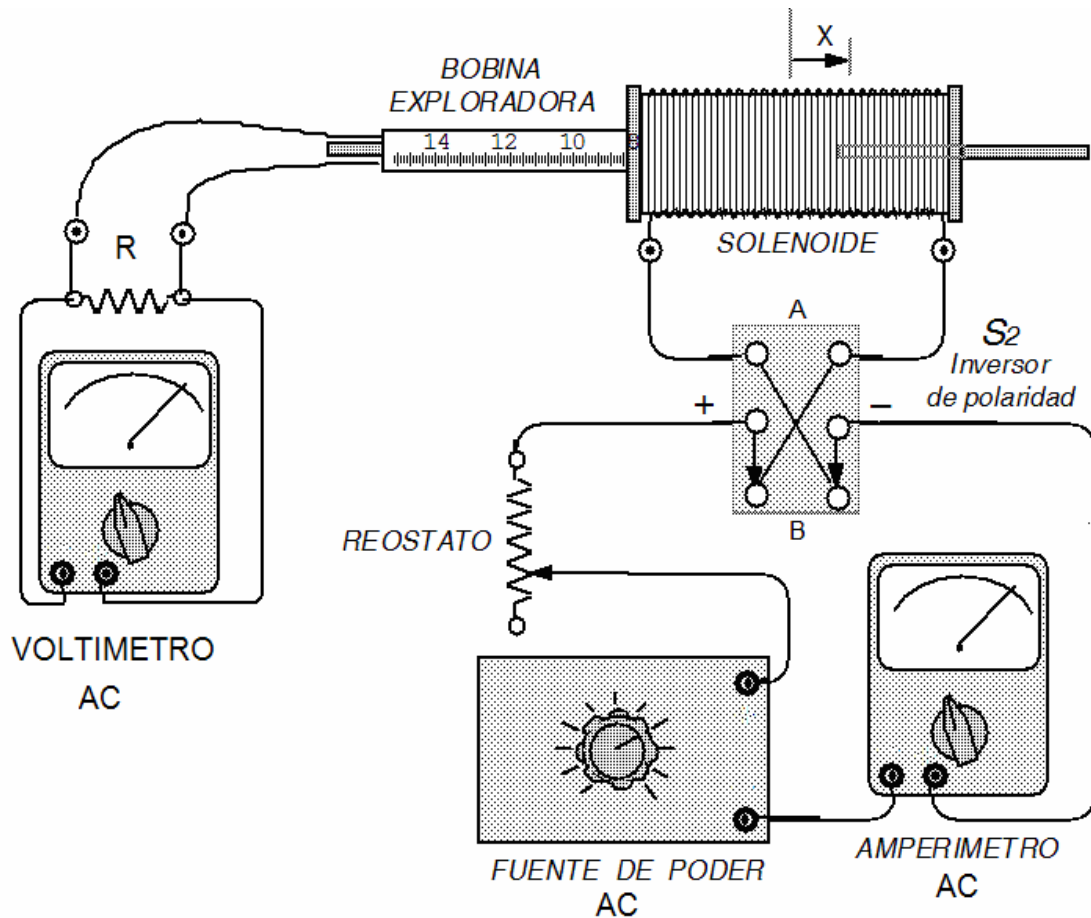
*SUGERENCIA: Determine primero el campo magnético en el eje de una espira circular y luego sume (integre) los campos de todas las espiras.*

---

## PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

### A. Calibración del sistema de medida

- A1.** Instale la bobina exploradora en la barra que sirve de soporte. Introdúzcala en el eje del solenoide de calibración, **de modo que quede en el centro del solenoide** y con su cara perpendicular al flujo.
- A2.** Conecte el solenoide en serie con la fuente AC y el amperímetro de AC a través del conmutador de inversión de polaridad,  $S_2$ , como indica la figura 4. Observe cómo se conecta este conmutador, el cual tiene tres posiciones y permite desconectar o conectar e invertir alternadamente el sentido de la corriente que circula por el solenoide. Si se usa corriente AC la posición de este conmutador es igual en las dos posiciones en que conecta.



**Fig. 4:** Montaje experimental

**A3.** Conecte la bobina exploradora a la resistencia y al voltímetro AC.



**ANTES DE ACTIVAR LA FUENTE, SU CIRCUITO  
DEBE SER REVISADO POR EL PROFESOR**

- A4.** Antes de activar la fuente de DC, ajuste inicialmente el reóstato para mínima corriente (máximo R). Prenda la fuente y regule el reóstato hasta que la lectura del amperímetro AC sea de 100 mA.
- A5.** Mida el valor del voltaje AC correspondiente a la bobina exploradora.
- A6.** Repita los pasos **A4 y A5** para valores de la corriente del solenoide de aproximadamente 100 mA, 200 mA, 300 mA, 400 mA y 500 mA. Anote en una tabla, los valores de Voltaje AC correspondientes a cada corriente:

$I$ (A)	$V$ (Volts)	$B_{calc}$ (Tesla)
0,1		
0,2		
0,3		
0,4		
0,5		

- A10.** En esa misma tabla, incluya para cada corriente, *el campo magnético en el centro* del solenoide de calibración, calculado de la expresión teórica.
- A11.** Grafique  $B$  (Tesla) como función de  $V_{ac}$  (Volts) y de la pendiente de la recta, determine la constante de calibración  $C$  (Tesla/Volt), con su respectivo error.

### **B. Determinación del número de vueltas de un solenoide.**

- B1.** Desconecte el solenoide de calibración y sustitúyalo por el solenoide de características desconocidas.
- B2.** Instale la bobina exploradora en la barra de vidrio que sirve de soporte. Introdúzcala en el eje del solenoide de calibración, de modo que pueda ser desplazada a lo largo de dicho eje.
- B3.** La posición de la bobina exploradora en el eje del solenoide se determina con ayuda de la escala milimetrada que tiene incorporada. Puede tomarse como marca de referencia uno de los bordes del solenoide. Ubique la bobina exploradora en el centro del solenoide ( $x = 0$ ).
- B4.** Ajuste la corriente en el solenoide a un valor fijo (por ejemplo  $I = 500\text{mA}$ ) y determine el voltaje  $V_{AC}$  correspondiente a la bobina exploradora. Cambie  $S_2$  para invertir la polaridad. Anote el nuevo valor y obtenga el promedio de las dos lecturas.
- B5.** Usando el valor de  $V_{AC}$  (Volts) y el de la constante de calibración  $C$  (Tesla/Volt) obtenida en la sección anterior, determine el valor del campo magnético en el centro del solenoide. Usando este valor de  $B$  (Tesla) y sabiendo la longitud  $L$  (m) y el radio  $R$  (m) del solenoide, utilice la expresión (4) para calcular su *número de vueltas*.

### C. Variación del campo magnético en el eje de un solenoide.

**C1.** Manteniendo constante la corriente en el solenoide de características desconocidas ( $i = 500 \text{ mA}$ ), repita las medidas sucesivamente para *diferentes posiciones de la bobina exploradora*, a intervalos de 2 cm y a cada lado del centro del solenoide hasta explorar todo el eje, incluyendo puntos afuera de los bordes. Puede ser necesario explorar en mayor detalle la región cercana a los bordes, tomando puntos adicionales intermedios.

$x(\text{cm})$	$V$ (Volts) derecha	$V$ (Volts) izquierda	$V$ (Volts) promedio	$B$ (Tesla)
.....				
-2,0				
0,0				
+2,0				

**C2.** Para cada posición  $x$  (cm), anote en una tabla los valores obtenidos y los correspondientes campos magnéticos  $B$  (Tesla), usando el valor de la constante  $C$  de calibración (Tesla/mm) obtenida en la parte A.

**C3.** Haga una gráfica sus resultados experimentales de  $B$  en función de  $x$ , a lo largo del eje del solenoide.

**C4.** Usando los valores de  $L$ (m),  $R$ (m) y  $N$  del solenoide y el valor utilizado de  $i$ , grafique  $B$  en función de  $x$ , a lo largo del eje del solenoide, calculado mediante la expresión teórica (1). Compare la dependencia  $B(x)$  vs  $x$  experimental con la predicción teórica, superponiendo ambas curvas en un mismo gráfico.

### D. Efecto de un núcleo de hierro.

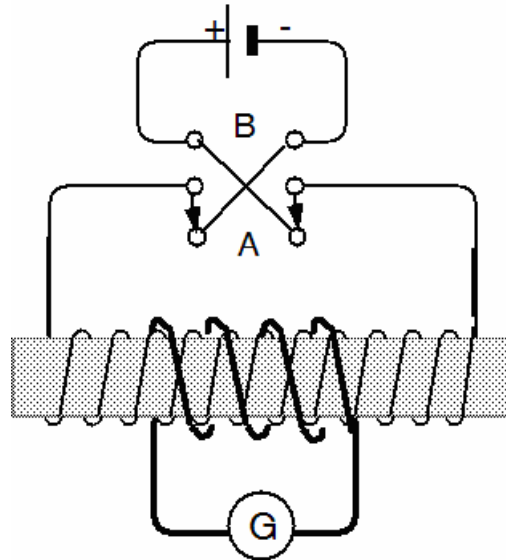
**D1.** Ajuste la corriente en el solenoide a un valor pequeño ( $I = 50 \text{ mA}$ ) y con la bobina exploradora en el centro del solenoide, y usando el procedimiento empleado anteriormente, mida los Voltajes y de allí determine el campo magnético.

**D2.** Coloque sobre la regla que sirve de guía a la bobina exploradora una pieza de *hierro* y vuelva a colocar la bobina exploradora en el centro del solenoide. Usando el mismo valor de corriente ( $I = 50 \text{ mA}$ ) mida el nuevo campo magnético.

**D3.** Compare los valores del campo magnético en la bobina exploradora con y sin núcleo de hierro. Dé una explicación a sus observaciones.

### PREGUNTAS

1. Una bobina está enrollada alrededor de un solenoide como indica la figura 6. El solenoide está alimentado de una batería a través de un conmutador inversor de polaridad, y la bobina está conectada a un galvanómetro



**Fig. 6:** Inducción de corriente en un galvanómetro

Determine en qué dirección circulará la corriente en el galvanómetro, considerando los siguientes casos:

- con el circuito tal como está, funcionando durante un tiempo largo.
  - el conmutador se cambia instantáneamente de la posición A a la posición B..
  - el conmutador se cambia instantáneamente de la posición B a la posición A.
  - se desconecta instantáneamente la batería.
2. ¿Cómo se podría determinar el número de vueltas de la bobina exploradora?

## **REFERENCIAS**

- D. Halliday, R. Resnick y K. Krane, *Física*, Vol. 2, Caps. 35, 36, 37, Ed. Continental (1995).
- R. M. Eisberg y L. S. Lerner, *Física*, Vol. 2, Caps. 23, 24, 25, Mc Graw-Hill (1984).
- R. A. Serway, *Física*, tomo 2, tercera edición, Caps. 30, 31, Mc. Graw- Hill (1992).
- P. A. Tipler, *Física*, tomo. 2, segunda edición, Caps. 27, 28, 29, Editorial Reverté (1985).

## *EL MAGNETOMETRO*

### **OBJETIVOS**

- Estudiar el funcionamiento del magnetómetro de deflexión.
- Estudiar el funcionamiento del magnetómetro de oscilación.
- Medir la componente horizontal del campo magnético terrestre.

### **MATERIALES**

1. Bobinas de Helmholtz.
2. Amperímetro DC.
3. Fuente de poder.
4. Reóstato.
5. Brújula.
6. Fuente de poder DC.
7. Barra imantada con hilo de suspensión.
8. Cronómetro.
9. Regla.
10. Cables de conexión.

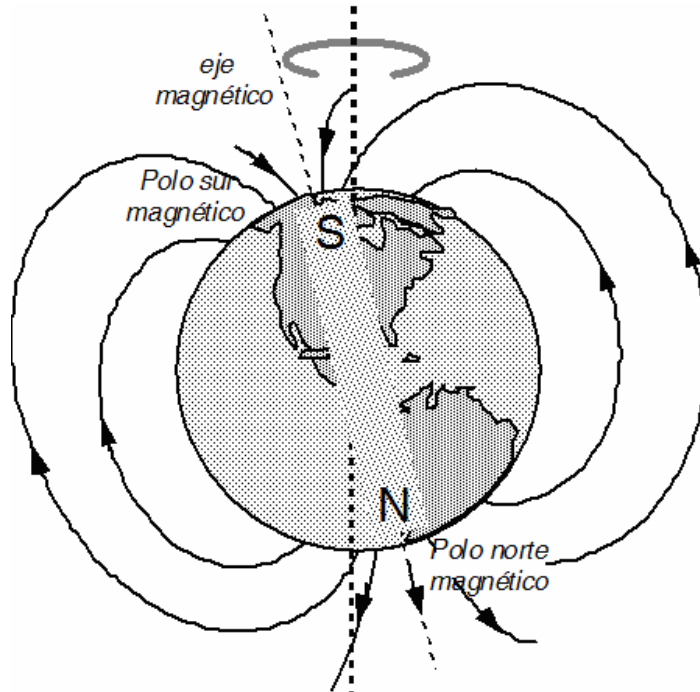
### **TEORIA**

#### ***A) El campo magnético terrestre***

El patrón del campo magnético terrestre se asemeja al de un dipolo magnético como sugiere la figura 1 y varía en magnitud entre aproximadamente  $3 \times 10^{-5}$  T en el ecuador magnético, hasta casi  $6 \times 10^{-5}$  T en los polos magnéticos. Los polos magnéticos de la Tierra sin embargo, no coinciden con los polos geográficos. El polo sur del dipolo que representa el campo de la Tierra queda cerca del polo norte geográfico de la Tierra.

El eje del dipolo forma un ángulo de cerca de  $11,5^\circ$  con el eje de rotación de la Tierra. En realidad, el patrón de las líneas cambia de manera continua y los polos norte y sur magnéticos se mueven durante tiempos que geológicamente son cortos; debido a ello, la declinación magnética, que es la diferencia angular entre el polo norte geográfico

verdadero y el polo norte magnético, cambia también año a año en el orden de 10 minutos por arco. ¡Existen evidencias de que el campo magnético terrestre ha invertido su dirección 171 veces en los últimos 17 millones de años!



**Fig. 1.** El campo magnético terrestre

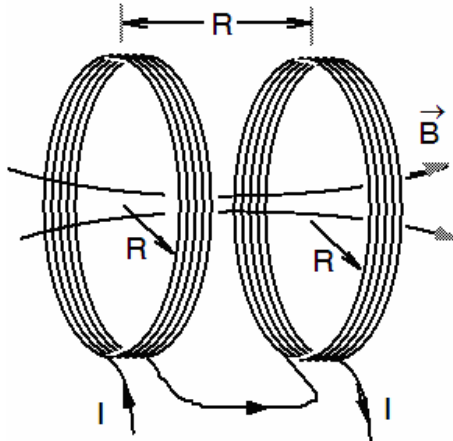
Se llama inclinación magnética al ángulo que forma la aguja de la brújula con el plano horizontal local. El ángulo de inclinación es naturalmente  $90^\circ$  en los polos y  $0^\circ$  en el ecuador magnético.

En este experimento mediremos la componente horizontal del campo magnético terrestre usando dos técnicas diferentes.

### ***B) Campo magnético de las bobinas de Helmholtz***

Los dos tipos de magnetómetros que describiremos más adelante hacen uso de unas bobinas de Helmholtz. Estas consisten en un par de bobinas idénticas, de radio  $R$  con un número  $N$  de vueltas, cuyos centros se encuentran separados por una distancia igual a sus radios (Fig. 2). Con esta configuración se logra un campo que es aproximadamente uniforme en la región central y viene dado por:

$$\vec{B} = \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{\mu_0 N I}{R} \hat{x} \quad (\text{tesla})$$



**Fig. 2.** Campo de las bobinas de Helmholtz

donde  $R$  es el radio (*en metros*),  $N$  el número de vueltas (*130 vueltas*) e  $i$  es la corriente que circula por las bobinas (*en amperes*). La constante  $\mu_0$  tiene un valor de  $4\pi \times 10^{-7}$  ( $T \cdot m/A$ ) y se denomina constante de permeabilidad magnética.

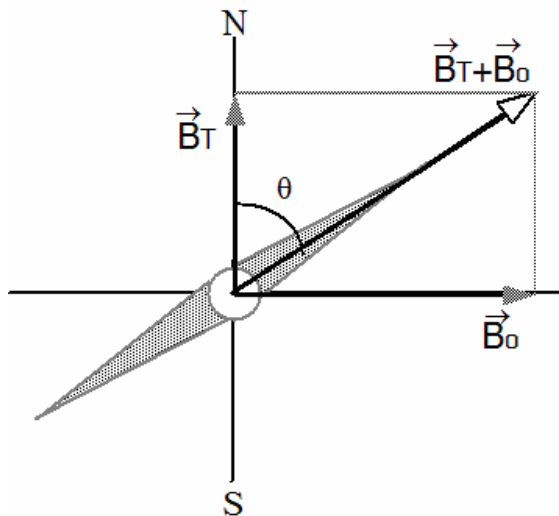
### **C) El magnetómetro de deflexión.**

Para determinar la componente horizontal del campo magnético terrestre,  $\vec{B}_T$ , se coloca una brújula en posición horizontal en la región central de las bobinas de Helmholtz. La disposición es tal que inicialmente la aguja apunta en la dirección de  $\vec{B}_T$  y de modo que el campo a aplicar mediante las bobinas de Helmholtz,  $\vec{B}_0$ , forme un ángulo recto con  $\vec{B}_T$  (Fig. 3).

Inicialmente, cuando no haya corriente en las bobinas, la aguja de la brújula quedará orientada hacia el norte. Pero cuando circule corriente por las bobinas se genera un campo magnético  $\vec{B}_0$ , y el campo resultante será la suma vectorial ( $\vec{B}_T + \vec{B}_0$ ) y la aguja de la brújula girará un ángulo  $\theta$  para alinearse en la dirección del campo resultante. El ángulo de desviación de la aguja viene dada por:

$$\text{tg } \theta = \frac{B_0}{B_T} \Rightarrow \boxed{B_T = \frac{B_0}{\text{tg } \theta}} \quad (2)$$

Esta relación nos permitirá calcular  $B_T$ , conociendo  $B_0$  y midiendo  $\theta$ .



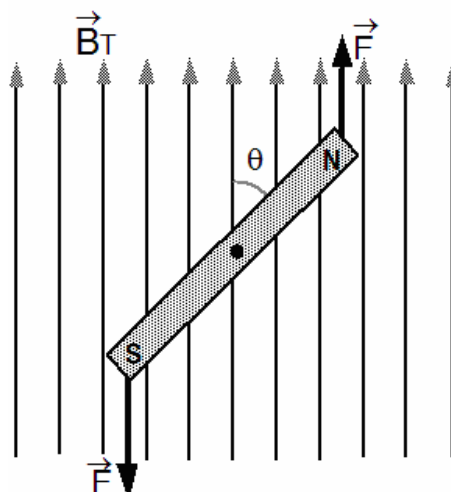
**Fig. 3.** Brujula orientada en el campo magnético resultante

**D) Magnetómetro de oscilación.**

Consideremos una barra imantada que se coloca en un campo magnético horizontal  $\vec{B}_T$  (Fig. 4). La barra está suspendida de un hilo vertical y puede girar alrededor de un eje que pasa por su centro (en el dibujo, el hilo quedaría perpendicular al plano del papel)

Cuando se desplaza la barra de su posición de equilibrio un ángulo  $\theta$ , las fuerzas magnéticas le producen un torque recuperador:

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}_T \quad \tau = -\mu B_T \text{sen}\theta$$



**Fig. 4.** Barra imantada en un campo magnético horizontal

siendo  $\mu$  el momento magnético de la barra. Si la barra se suelta desde una posición angular como la mostrada en la figura 4, oscilará alrededor de un eje que es perpendicular al campo. Si  $\theta$  es pequeño,  $\tau \approx \mu B_T \theta$ , y suponiendo que la torsión de la suspensión es despreciable, la ecuación de movimiento de la barra será:

$$I \left( \frac{d^2 \theta}{dt^2} \right) + \mu B_T \theta = 0$$

Esta ecuación corresponde a un movimiento del tipo armónico simple cuyo período de oscilación está dado por:

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{I}{\mu B_T}} \quad (2)$$

Donde  $I$  es el momento de inercia de la barra respecto del eje que pasa por la suspensión. La expresión para el período es válida para oscilaciones pequeñas y podría ser empleada para determinar la componente horizontal del campo magnético terrestre.

Supongamos ahora que se añade al campo magnético terrestre  $B_T$  un campo producido por las bobinas de Helmholtz  $B_o$ , paralelo al campo  $B_T$ . La barra magnética suspendida se encuentra ahora bajo la influencia del campo resultante  $B = B_T + B_o$ . El nuevo período de oscilación será:

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{I}{\mu(B_T + B_o)}} \quad (3)$$

Tomando el inverso de  $T_2$  y elevándolo al cuadrado, obtenemos la relación siguiente:

$$\frac{1}{T_2^2} = \frac{\mu B_T}{4\pi^2} + \frac{\mu B_o}{4\pi^2 I}$$

Reemplazando en esta expresión  $(4\pi^2 / \mu B_T)$  por  $T_1^2$  tenemos:

$$\frac{1}{T_2^2} = \left( \frac{1}{T_1^2} \right) + \left( \frac{1}{T_1^2 B_T} \right) B_o$$

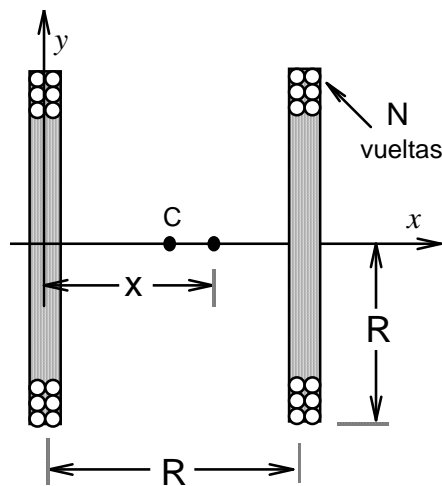
Esta ecuación constituye una relación lineal entre las variables  $(1/T_2^2)$  y  $B_o$ . Si medimos  $T_2$  en función del campo de la bobina  $B_o$  y graficamos  $(1/T_2^2)$  vs  $B_o$ ,

podemos determinar la componente horizontal del campo terrestre  $B_T$  de la pendiente de la gráfica, y conocido el valor de  $T_1$ .

## ACTIVIDADES PRELIMINARES

### Campo magnético en el eje de las bobinas de Helmholtz

Dos bobinas circulares de radio  $R$  y de  $N$  vueltas cada una están perpendiculares a un eje común. Las bobinas están centradas y apartadas una distancia  $R$  y una corriente  $I$  constante fluye en la misma dirección en cada bobina, como se muestra en la figura.



**Fig. 5.** Bobinas de Helmholtz

a) Demuestre que el campo magnético sobre el eje a una distancia  $x$  del centro de una de ellas es:

$$B = \frac{\mu_0 N I R^2}{2} \left[ \frac{1}{(R^2 + x^2)^{3/2}} + \frac{1}{(R^2 + (R - x)^2)^{3/2}} \right]$$

b) Demuestre que las derivadas:  $(dB/dx)$  y  $(d^2B/dx^2)$  se anulan en el punto medio  $x=R/2$ . Esto significa que el campo magnético en la región media entre las bobinas es uniforme.

c) Demuestre que el campo en el punto medio viene dado por:

$$\vec{B} = \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{\mu_0 N I}{R} \hat{x} \quad (\text{tesla})$$

## PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

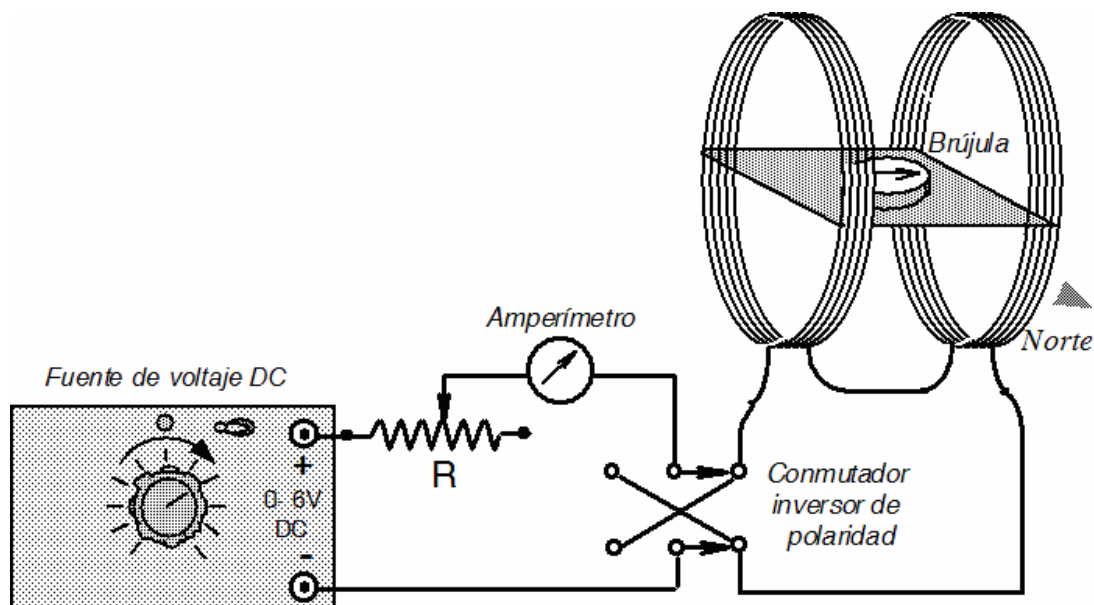
### A. Determinación del campo magnético terrestre con el magnetómetro de deflexión.

En esta parte de la práctica se coloca una brújula en el centro de las bobinas de Helmholtz, de modo que el campo de las bobinas sea transversal a la componente horizontal del campo magnético terrestre. Luego se miden las desviaciones de la brújula para diferentes valores del campo de las bobinas.

**A1.** Conecte el circuito de alimentación de las bobinas de Helmholtz mostrado a continuación. El reóstato en serie con el amperímetro sirve para limitar el valor de la corriente suministrada a las bobinas. El valor de la corriente se regula mediante el control del voltaje de salida de la fuente.

**A2.** Coloque la brújula horizontalmente en la región media entre las dos bobinas y orientela para que la aguja indique cero grados. Asegúrese de que el plano de las bobinas quede paralelo a la dirección norte-sur. Es importante colocar las bobinas de Helmholtz lo más alejadas posible del resto de los aparatos y evitar la presencia de objetos magnéticos en la vecindad de la brújula. ¿Por qué?

**A3.** Antes de activar la fuente asegúrese de que el amperímetro esté inicialmente en una escala alta de corriente. Ajuste el reóstato hasta obtener una corriente en las bobinas de 10 mA. Observe la deflexión de la brújula. Invierta el sentido de la corriente mediante el conmutador inversor de polaridad y mida la nueva deflexión de la aguja.



**Fig. 6.** El magnetómetro de deflexión

**A4.** Repita el procedimiento anterior para valores de corriente comprendidos entre 5 y 50 mA y anote sus valores en una tabla.

Corriente $I$ (mA)	$\theta$ (grados) derecha	$\theta$ (grados) izquierda	$\theta$ (grados) promedio	Campo bobinas $B_0$ (tesla)	Campo terrestre $B_T$ (tesla)
5					
.....					
.....					
.....					
.....					
50					
				$B_T \bar{\theta}$ (promedio)	

**A5.** Mida el diámetro de las bobinas y, conocido el número de vueltas ( $N=130$  vueltas), para cada valor de la corriente calcule el correspondiente valor del campo magnético  $B_0$  en el centro de las bobinas de Helmholtz (Ec. 1).

**A6.** Para cada valor de  $\theta$  y de  $B_0$  calcule el valor de  $B_T$ . Determine el valor promedio de  $B_T$  (Tesla) y estime el correspondiente error en su medida. Alternativamente podría obtener estos valores mediante una gráfica.

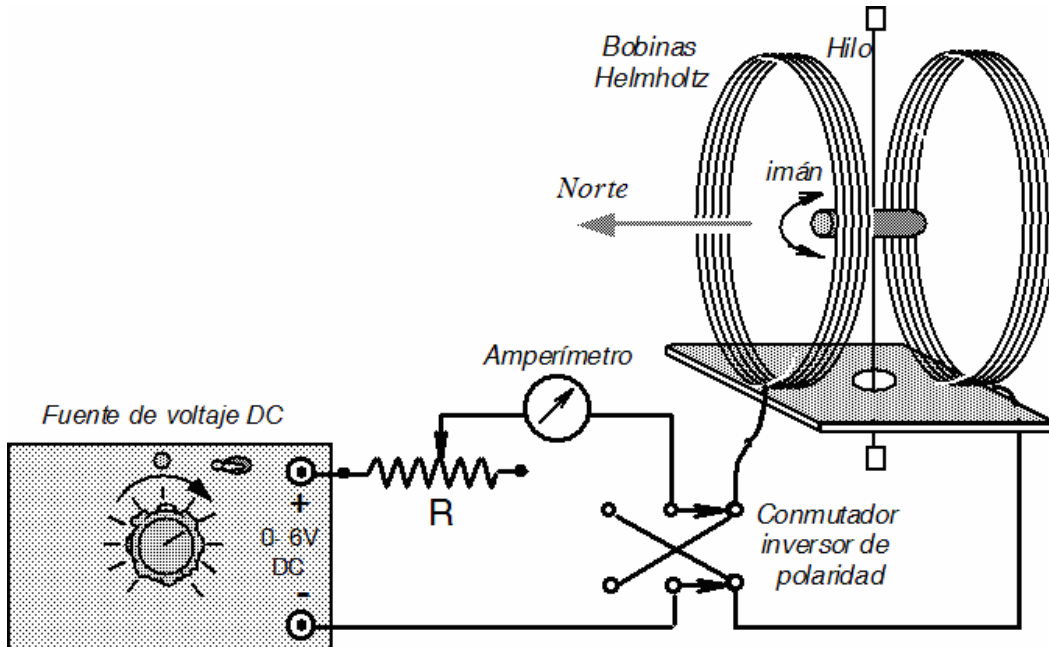
## **B. Determinación del campo magnético terrestre con el magnetómetro de oscilación.**

*En esta parte de la práctica, un imán de barra suspendido por un filamento se coloca en el centro de las bobinas de Helmholtz con el campo de éstas alineado con la componente horizontal del campo terrestre. A continuación se miden los períodos de pequeñas oscilaciones del péndulo de torsión.*

**B1.** Coloque las bobinas de Helmholtz de forma que el plano de las bobinas quede alineado perpendicularmente al campo magnético terrestre. Conecte el circuito de alimentación de las bobinas de Helmholtz. El valor de la corriente en la bobina se ajusta mediante el control de voltaje de la fuente. Antes de activar la fuente asegúrese de que el amperímetro esté inicialmente en una escala alta de corriente.

**B2.** Asegúrese de que la dirección de la corriente en la bobina sea tal que el campo magnético generado esté en el mismo *sentido* que el campo magnético terrestre. Para ello haga oscilar el péndulo con una amplitud pequeña (unos 15 grados) y observe el efecto sobre el período al aumentar la corriente. ¿Debería el período aumentar o disminuir al aumentar la corriente?

**B3.** Inicialmente, con cero campo de las bobinas, desplace el péndulo de su posición de equilibrio de modo que oscile con pequeñas amplitudes. Cunte el tiempo que tarda el péndulo en completar 20 oscilaciones y de allí determine el período de las oscilaciones. ¿Por qué debes considerar tantas oscilaciones?



**Fig. 7.** El magnetómetro de oscilación

**B4.** Repita el paso B3 para seis diferentes valores de la corriente en las bobinas, comprendidos entre 10 mA y 50 mA. Anote los resultados de sus medidas en una tabla. Incluya en la tabla una columna con los valores del campo  $B_0$  de las bobinas correspondientes a cada corriente.

Corriente $I$ (mA)	Tiempo para 20 oscilaciones(s)	Período $T$ (s)	Campo aplicado $B_0$ (tesla)
0	....	....	0
10	.....		
.....			
50			

**B5.** Haga una gráfica de  $(1/T_2^2)$  en función del campo  $B_0$  aplicado por las bobinas de Helmholtz. A partir de esta gráfica obtenga la componente horizontal del campo terrestre,  $B_T$ , con el correspondiente error.

**B6.** Compare los valores de la componente horizontal del campo terrestre obtenidos por los dos diferentes métodos: (A) el magnetómetro de deflexión y (B) el magnetómetro de oscilación.

## **PREGUNTAS**

1. ¿Cuál de los dos métodos utilizados para la determinación de la componente horizontal del campo terrestre ofrece mayor precisión?
2. Discuta otro método que podría ser utilizado para determinar el campo magnético terrestre. Señale las ventajas o desventajas que ofrecería con respecto al método usado.
3. En Sartenejas el campo magnético terrestre tiene un ángulo de inclinación de aproximadamente  $40^\circ$ . ¿Cuál es la magnitud del campo magnético total?. ¿cuál es la magnitud de su componente vertical?
4. ¿Cómo se podría determinar el momento dipolar magnético del imán de barra?
5. Un estudiante asegura que después de haberse montado en el metro, su brújula se dañó de tal forma que ahora siempre apunta hacia el sur. ¿Es esto posible?

## **REFERENCIAS**

1. D. Halliday, R. Resnick y K. Krane, *Física*, Vol. 2, Caps. 35,37, Ed. Continental (1995).
2. R. M. Eisberg y L. S. Lerner, *Física*, Vol. 2, Cap. 23, Mc Graw-Hill (1984).
3. R. A. Serway, *Física*, tomo 2, tercera edición, Caps. 30, 31, Mc Graw- Hill (1992).
4. P. A. Tipler, *Física*, tomo 2, segunda edición, Caps. 27, 28, 29, Editorial Reverté (1985).



---

## ***OPTICA GEOMETRICA II***

### **OBJETIVOS**

- Estudiar los fenómenos básicos de la óptica geométrica para espejos cilíndricos y lentes delgadas.
- Determinar por distintos métodos el foco de espejos cilíndricos, lentes delgadas y combinaciones de lentes.
- Estudiar las aberraciones cromáticas y esféricas.
- Estudiar la profundidad de campo.

### **MATERIALES**

1. Banco óptico.
2. Plato rotatorio.
3. Base para el plato rotatorio.
4. Fuente luminosa.
5. Sistema colimador (placas de apertura variable, soportes, lente de rayos paralelos, placas de una rendija y de varias rendijas).
7. Espejo cilíndrico.
8. Lentes (convergente y divergente).
9. Pantalla visora.

### **TEORIA**

#### **1. *Espejos cilíndricos***

Trabajaremos en la hipótesis aproximada de que todos los rayos de luz forman ángulos pequeños con el eje del espejo (en cuyo caso se denominan *rayos paraxiales*). Esta aproximación no es necesaria en el caso de espejos planos.

Utilizando la ley de la reflexión y la geometría elemental, podemos establecer que la ecuación que relaciona las tres distancias presentadas en la Figura 1 ( $o$ ,  $i$  y el radio de curvatura  $r$  del espejo) es la siguiente:

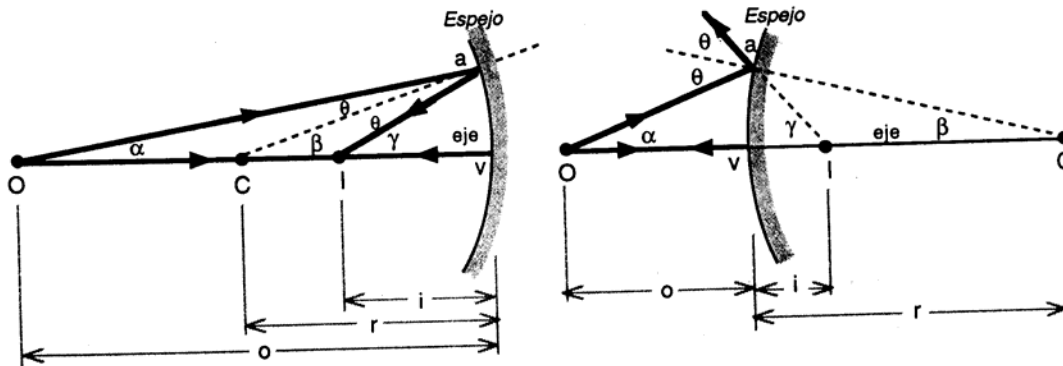


Figura 1. Formación de imágenes en espejos cilíndricos (caso general)

$$\frac{1}{o} + \frac{1}{i} = \frac{2}{r} \quad (1)$$

Cuando la distancia del objeto a la lente es mucho mayor que el radio de curvatura del espejo (en la práctica, esto equivale a asumir que  $o \rightarrow \infty$ ), el término  $1/o$  de la Ecuación 1 puede despreciarse dando como resultado que la distancia de la imagen a la lente es  $i = r/2$ . Esta distancia se denomina *distancia focal f* del espejo:

$$f = R/2 \quad (2)$$

Al incidir rayos paralelos sobre un espejo cóncavo, los mismos se reflejan pasando por el foco, como se muestra en la Figura 2. En el caso de un espejo convexo y rayos incidentes paralelos, las prolongaciones de los rayos reflejados pasan por el foco.

En términos de la distancia focal, la ecuación de los espejos puede ser reescrita de la siguiente manera:

$$\frac{1}{o} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f} \quad (3)$$

El *aumento lateral m* permite comparar el tamaño de la imagen con el tamaño del objeto:

$$m = -\frac{i}{o} \quad (4)$$

El signo de  $m$  se define de suerte tal que  $m > 0$  si la imagen es derecha con respecto al objeto, y  $m < 0$  si la imagen está invertida con respecto al objeto.

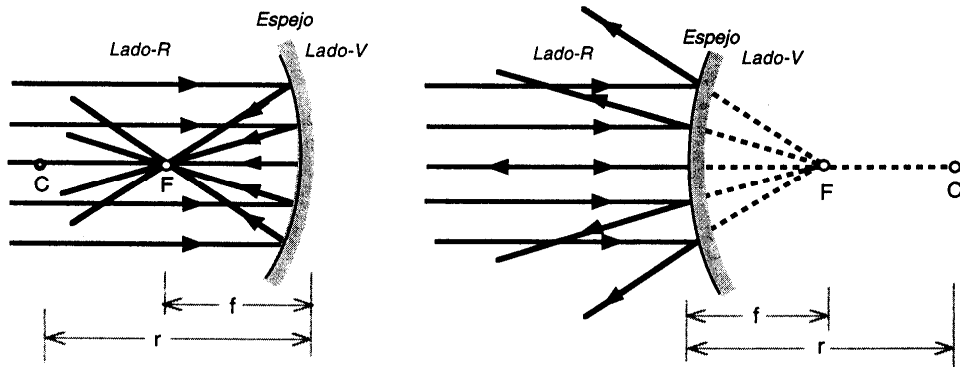


Figura 2. Formación de imágenes en espejos cilíndricos (rayos paralelos).

La Figura 2 sugiere las convenciones de signo asociadas a las ecuaciones (1) y (3). El lado del espejo desde el cual incide la luz es el *lado-R* porque en este lado la luz convergente puede formar *imágenes reales*. En el *lado-R* del espejo, las variables  $i$ ,  $o$  y  $f$  se son positivas por convención. La región al otro lado del espejo es el *lado-V*, en el cual la luz divergente puede formar *imágenes virtuales*. En el *lado-V* del espejo, las variables  $i$ ,  $o$  y  $f$  se toman negativas.

## II. Lentes delgadas

En el caso de las lentes existen dos superficies refringentes. Consideramos como objeto para la segunda refracción la imagen que el objeto produce a raíz de la primera refracción.

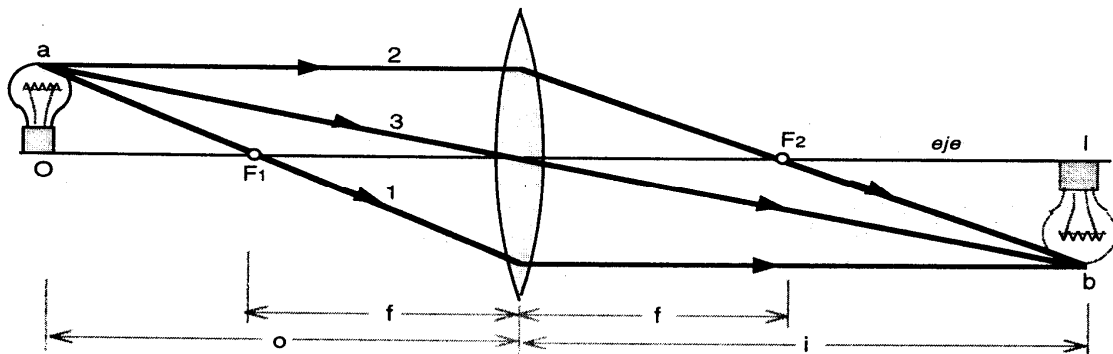


Figura 3. Formación de imágenes en una lente delgada convergente.

Una lente se considera *delgada* si el grosor de la lente es pequeño en comparación con la distancia al objeto  $o$ , la distancia a la imagen  $i$  y los radios de curvatura  $r_1$  y  $r_2$  de cada una de las superficies refringentes. Para las lentes delgadas y rayos paraxiales estas cantidades están relacionadas por la siguiente expresión (ver la Figura 3):

$$\frac{1}{o} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f} \quad 5)$$

La distancia focal  $f$  exhibe dependencia del índice de refracción  $n$  y está dada por:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (6)$$

Note que la Ecuación 5 es igual a la Ecuación 3, propia de los espejos cilíndricos. La relación 6 se conoce como la *ecuación del fabricante de lentes*.

Las convenciones de signos para  $o$ ,  $i$ ,  $r_1$  y  $r_2$  son similares a las adoptadas en el caso de los espejos cilíndricos. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que, para los espejos, las imágenes reales se forman del lado por el cual incide la luz (*lado-R* del espejo) mientras, en el caso de las lentes, las imágenes reales se forman *en el lado opuesto* (el cual será el *lado-R* de la lente). En el caso de las lentes, la luz incide por el *lado-V*.

Los radios de curvatura  $r_1$  y  $r_2$  son positivos si se encuentran en *el lado-R*; la distancia al objeto  $o$  es positiva si el objeto es real y se encuentra en el *lado-V*, y la distancia a la imagen  $i$  es positiva si la imagen está en el *lado-R*.

El aumento lateral de una lente delgada está dado por la misma expresión de los espejos esféricos:

$$m = -\frac{i}{o} \quad 7)$$

En los instrumentos ópticos, las imágenes se forman gracias a una combinación de varias lentes o espejos. El análisis de la formación de imágenes por sistemas ópticos compuestos es directo: se considera cada uno de los elementos de manera aislada, tomando la imagen formada por un elemento como el objeto del siguiente, teniendo el cuidado de preservar la convención de signos en cada caso.

### **III. Aberraciones**

Las imágenes formadas por los espejos esféricos y por las lentes adolecen de varios defectos. Debido a que la suposición de que los rayos son paraxiales nunca está completamente justificada, un objeto puntual no forma una imagen puntual y también se produce una distorsión debida a la variación de aumento con la distancia al eje de la lente. Sobrepuesto a estos defectos existen los

efectos de difracción que resultan de que la hipótesis fundamental de la óptica geométrica, esto es, que la luz avanza en Línea recta, debe considerarse sólo como una aproximación.

Para las lentes, pero no para los espejos, la distancia focal depende de su índice de refracción, el cual varía con la longitud de onda. Por consiguiente, si la luz que procede de un objeto no es monocromática, la lente forma varias imágenes coloreadas que se encuentran en distintas posiciones y tienen tamaños diferentes, aún estando formadas por rayos paraxiales. La aberración cromática es una distorsión óptica ocasionada por la imposibilidad de una lente de enfocar todos los colores en un mismo punto. Las lentes "acromáticas" fabricadas para cámaras fotográficas están hechas con varias lentes de distintos vidrios que compensan la aberración cromática.

Los efectos producidos por la variación del índice de refracción con la longitud de onda reciben el nombre de *aberraciones cromáticas*. Las discrepancias que se producirían aunque la luz fuera monocromática se llaman *aberraciones esféricas*.

Las aberraciones de las lentes y los espejos *no* se deben a defectos de construcción, tales como el no ser exactamente esféricos, sino que son consecuencias de las leyes de la refracción en las superficies esféricas.

#### **IV. Profundidad de campo**

A causa de las aberraciones de las lentes, la imagen de un punto de un objeto dado es un pequeño círculo, el *círculo de máxima nitidez*, aún con el mejor enfoque. Los círculos correspondientes a puntos situados a otras distancias serán mayores. Si no es necesaria una nitidez extrema de la imagen, existe evidentemente cierto campo de distancias a los objetos, llamado *profundidad de campo*, tal que todos los objetos situados dentro de este campo quedan enfocados simultáneamente. Esto es, los círculos imágenes de los puntos comprendidos dentro de tal campo no son tan grandes que resulte inadmisibles la imagen del objeto.

La profundidad de campo es una medida de cuánto puede variarse la distancia entre el lente y la pantalla a la vez que se preserva una imagen bien enfocada. El "tamaño de la apertura" tiene un efecto importante sobre esta variable del enfoque de las imágenes dado que disminuye la incidencia de rayos que no sean paraxiales.

Un instrumento diseñado para la observación galáctica (profundidad de campo estrecha) debe distinguirse de uno diseñado para la observación de meteoros (profundidad de campo ancha).

## ACTIVIDADES PRELIMINARES

- a) *Pares conjugados*. Consideremos un par de datos que representan las variables  $o$  e  $i$ . Los valores de estas dos variables pueden intercambiarse entre sí. Explique por qué.
- b) Considere un sistema formado por un par de lentes adosadas. Tome la primera de ellas como convergente ( $f_{lente\ 1} > 0$ ) Y la segunda como divergente ( $f_{lente\ 2} < 0$ ). Demuestre que la expresión que relaciona la distancia foca  $I$  del sistema de lentes adosadas es:

$$\frac{1}{f_{sistema}} = \frac{1}{f_{lente\ 1}} + \frac{1}{f_{lente\ 2}}$$

## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

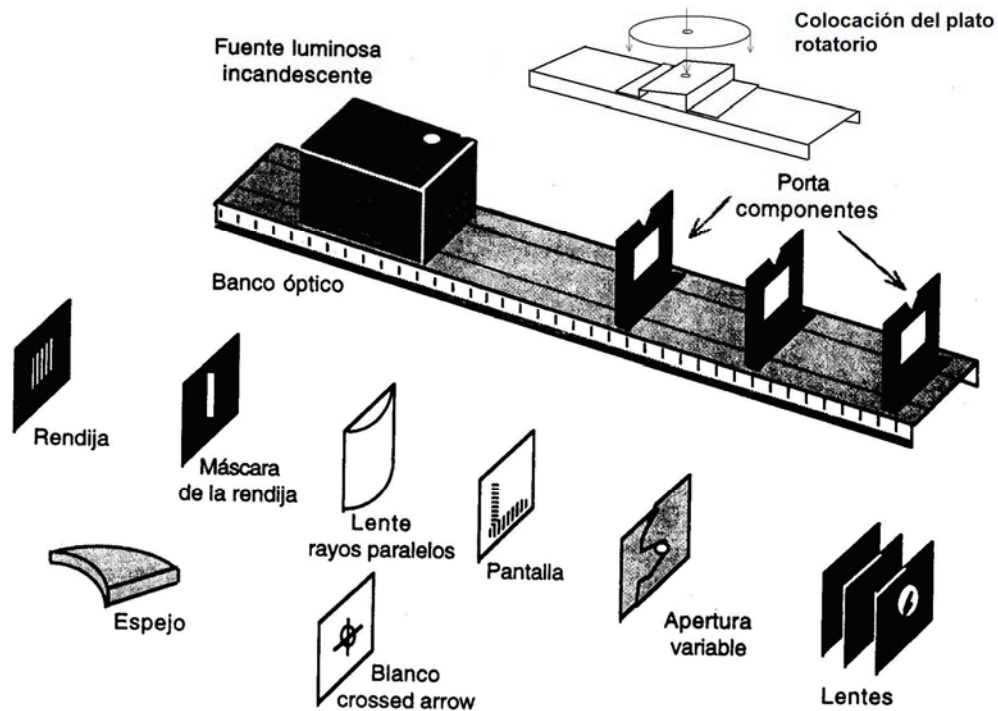


Figura 4. Montaje experimental.

### A. Espejo cilíndrico

- AI.** Coloque sobre el banco óptico la fuente luminosa y el plato rotatorio (por su lado cuadrículado) junto con su base. En esta experiencia se trabaja con la

configuración de haces paralelos, para lo cual se utiliza el sistema de rendijas y la lente de rayos paralelos. Esta configuración se obtiene colocando sobre una base, luego de la fuente luminosa, la lente de rayos paralelos. Justo después y sobre otro soporte se coloca la placa con el sistema de rendijas. Inmediatamente a continuación el plato rotatorio. Debe observar por lo menos cinco haces colimados y paralelos sobre el plato rotatorio. Se debe procurar además que la configuración de haces paralelos incida en forma simétrica respecto al eje óptico.

**A2.** Luego de formar un haz fino de rayos paralelos y colimados sobre el plato rotatorio, alinee el haz sobre el eje óptico, esto es, sobre alguno de los ejes marcados en el plato. Coloque el espejo cilíndrico con su superficie cóncava enfrentada al haz, de manera que el haz reflejado converja sobre el eje de referencia. Mida la distancia focal  $f$  para la superficie cóncava del espejo. ¿Cuál es el error en la determinación de este valor?

**A3.** Cambie la superficie cóncava por la convexa y determine en este caso la distancia focal. Para ello, debido a que los haces no convergen en ningún punto, hay que trazar sobre una hoja, colocada sobre el plato rotatorio, los haces reflejados (divergentes) de la superficie y prolongarlos en línea recta hasta su punto de intersección, cuya distancia a la superficie convexa es el foco. ¿Cuáles el error de la distancia focal en este caso?

**A4.** A partir de la distancia focal, determine el radio de curvatura de cada superficie con su respectivo error.

## ***B. Lentes delgadas***

**B1. Lente convergente.** Retirar el sistema de rendijas, la lente de rayos paralelos, el plato rotatorio y su base. Colocar sobre el banco óptico (en su respectiva base), el objeto (crossed arrow), la lente convergente y la pantalla visora de forma que se vea la imagen en foco. Ajuste las distancias objeto-lente y lente-pantalla hasta que se observe una imagen nítida en la pantalla. Variando la distancia objeto-lente, tome por lo menos cinco puntos de pares conjugados objeto-lente e imagen-lente, midiendo para cada caso el tamaño de la imagen cuando está en foco. Recuerde que la posición de la lente no coincide con la de su base.

**B2.** A partir de estos datos, construya una tabla con las distancias objeto-lente, imagen-lente y magnificación. Utilizando la ecuación de las lentes delgadas

(Ecuación 5), determine la distancia focal promedio y su error.

- B3.** Represente gráficamente  $1/i$  vs  $1/o$  para cada *par conjugado* y determine la distancia focal con su respectivo error. Como? Con la ecuación  $1/i = A(1/o) + B$  y  $1/f = 1/i + 1/o$  queda  $f = 1 / [(A+1)1/o + B]$

El foco se obtiene para  $o \rightarrow \infty$  o sea el foco es  $f = 1/B$

- B4.** Represente gráficamente  $m$  vs  $i$  y determine nuevamente el foco con su error. La ecuación que corresponde a este gráfico se obtiene eliminando  $o$  entre las ecuaciones 5 y 7.

- B5.** Represente en el eje de las abscisas la variable  $i$  y en el eje de las ordenadas la variable  $o$ . Una los dos puntos con una recta. Repita la operación para todos los pares conjugados (todos los pares conjugados deben representarse en un mismo gráfico). Esta representación también permite determinar la distancia focal con su respectivo error: la distancia focal estará dada por la media de los puntos de intersección de las rectas para cada par conjugado y el error lo da la región en la cual se distribuyen los puntos de intersección de las rectas.

- B6.** Demuestre que la representación utilizada en la sección B5 es un método capaz de proporcionar la distancia focal. Para ello interseque analíticamente las rectas correspondientes a un par conjugado cualquiera. **Ayuda:** iguale las abscisas para ambas rectas y encuentre el valor de la ordenada común y viceversa.

- B7. Sistema convergente-divergente.** Proceda a repetir las secciones B1 hasta B5 con un sistema de lentes formado por la lente convergente caracterizada en la sección anterior y una lente divergente de distancias focal desconocida. Para esto, proceda a sujetar la lente divergente en la misma base utilizada para la lente convergente sujetándola con un gancho.

- B8.** A partir de la distancia focal medida para el sistema convergente-divergente y para la lente convergente sola, determine con su respectivo error, el foco de la lente divergente. (ver Actividades preliminares, inciso b)

### **C. Aberraciones y profundidad de campo.**

- C1. Aberración esfera.** Partiendo del montaje utilizado en la sección B1, proceda a enfocar la imagen en la pantalla visora, para una distancia objeto-lente tal que  $m < 1$ . Coloque en el lado opuesto de la base de la lente, la rendija de apertura variable. Partiendo de la máxima apertura posible, proceda a acercar las placas, evitando tapar la zona central de la lente. Observe simultáneamente la imagen en la pantalla ¿Cómo afecta la apertura el foco de la imagen? ¿Qué se puede concluir al respecto?

**C2. Profundidad de Campo.** Para una apertura completa, determine el rango dentro del cual la imagen permanece enfocada. Sin cambiar la distancia objeto-lente, disminuya la separación entre placas hasta obtener la menor apertura posible con la cual puede observarse la imagen. Determine nuevamente el rango dentro del cual permanece enfocada la imagen. ¿Qué se puede concluir de estos resultados? Explique.

**C3. Aberración cromática.** Proceda a quitar el objeto con su base del banco óptico y enfoque, sobre la pantalla visora, el filamento de la fuente luminosa. Coloque las piezas que dejan una ranura vertical. Proceda ahora a deslizar lateralmente la apertura frente a la lente ¿Como afecta esto la imagen? Explique sus observaciones.

## **PREGUNTAS**

- 1.** Demuestre que la distancia focal de una lente convergente es positiva
- 2.** Demuestre que la distancia focal de una lente divergente es negativa.
- 3.** Para corregir la aberración cromática en sistemas de imágenes, se emplean dobletes de lentes llamados "acromáticos". Explique su funcionamiento desde un punto de vista cualitativo y cuantitativo.
- 4.** Se requiere que una lente delgada plano-convexa forme una imagen real de un tamaño del doble del objeto. Si la lente tiene un radio de curvatura de 50 cm y un índice de refracción de  $n = 1,5$ , determinar las posiciones del objeto y de la imagen con respecto a la lente.
- 5.** Describa cualitativa y cuantitativamente lo mejor posible el funcionamiento del microscopio más simple, esto es, una lupa, compuesta por una lente delgada convergente.

## **REFERENCIAS**

- 1.D. Halliday, R. Resnick y K. Krane, *Physics*, Vol. 2 (extended), Cap. 44, John Wiley & Sons (1992).
- 2.
- 3.P. A. Tipler, *Física*, Vol. 2, segunda edición, Cap. 27, Editorial Reverté Venezolana (1984).

## *INTERFERENCIA Y DIFRACCION*

### **OBJETIVOS**

- 1) Estudiar los fenómenos de interferencia y difracción en ranuras y redes.
- 2) Determinar la longitud de onda del láser He-Ne.
- 3) Determinar del espesor de un cabello.
- 4) Determinar del número de surcos por mm en un disco compacto (CD).

### **MATERIALES**

1. Láser continuo de Helio -Neón ( $\lambda=632,8$  nm)
2. Mosaicos de difracción conteniendo ranuras y redes.
3. Banco óptico
4. Pantalla con pinza para sujetar papel.
5. Tornillo micrométrico y regla graduada.
6. Pantalla horizontal con orificio central.
7. Soportes para pantalla, láser y ranuras
8. Pinza para sujetar objetos: Diapositiva, cabello, disco compacto (CD).
9. Portaobjetos con un cabello.

### **TEORIA**

La difracción se refiere a la propiedad que tienen todas las ondas de bordear obstáculos, es decir, de desviarse hacia una nueva dirección cuando encuentran un objeto (barrera o abertura) en su camino. La difracción de las ondas sonoras es un fenómeno que percibimos constantemente en la vida cotidiana. Podemos escuchar sonidos aun cuando no estemos en línea directa a su fuente. Para que se presente la difracción el tamaño del objeto debe ser del mismo orden de la longitud de onda. Usualmente no nos percatamos de la difracción de la luz debido a la pequeñez de la longitud de estas ondas.

Entre la interferencia y la difracción no existe diferencia física esencial, ya que ambos resultan del mismo fenómeno de redistribución de la energía luminosa debido a la superposición de ondas coherentes. Se utiliza el término interferencia para referirnos al resultado de la superposición de un número finito (usualmente pequeño) de ondas y el

término difracción para la superposición de un número grande de fuentes infinitesimales y casi siempre contiguas.

### A) Difracción de una ranura.

La difracción se puede entender por medio del principio de Huygens, según el cual cada elemento de un frente de onda sirve de fuente de una onda esférica secundaria. Sea una ranura muy estrecha de ancho "a" sobre la cual incide un haz paralelo de luz monocromática de longitud de onda  $\lambda$  (siendo  $\lambda < a$ ). Consideremos el caso en que la pantalla se encuentra tan lejos del obstáculo que los rayos que llegan al punto de observación son prácticamente paralelos (difracción de Fraunhofer).

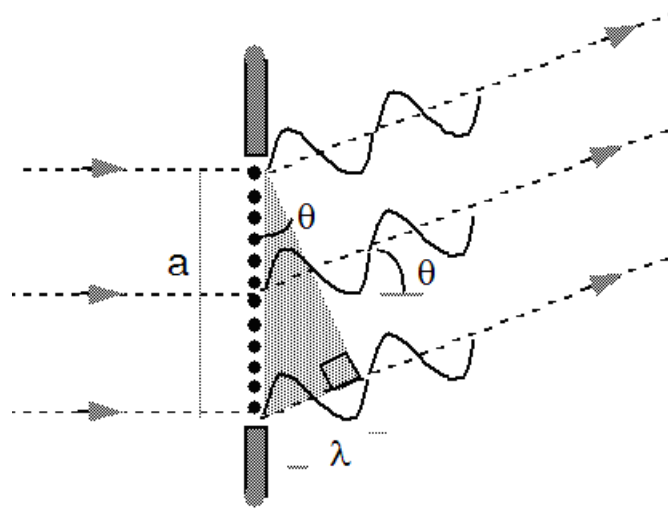


Figura 1 Ondas que emergen de una ranura

Las ondas secundarias que salen en la misma dirección del haz incidente ( $\theta=0$ ) están todas en fase, de modo que en el centro de la pantalla habrá interferencia constructiva. En general, cuando la diferencia de camino entre dos rayos es  $\lambda/2$ , interferirán destructivamente. Si consideramos un ángulo  $\theta$  tal que el rayo de la parte inferior de la ranura recorre exactamente una longitud de onda más que el rayo del borde superior. Entonces el rayo que pasa por el centro recorrerá  $\lambda/2$  más que el rayo de la parte superior. Estos rayos estarán fuera de fase e interferirán en la pantalla de manera destructiva (ver el diagrama anterior).

En forma análoga, para todo punto en la mitad superior de la ranura, hay un punto en la mitad inferior, que estará desfasado en  $\lambda/2$ . Por consiguiente todos los rayos interfieren destructivamente en pares. El primer ángulo para interferencia destructiva está dado por la condición  $a \sin \theta = \lambda$ . Si ahora dividimos la ranura en cuatro regiones, cada una con muchas fuentes habrá cancelación en pares cada vez que se cumpla  $a \sin \theta = 2\lambda$ . Si continuamos con este proceso, encontramos que hay interferencia destructiva (intensidad cero) para los ángulos de observación dados por:

$$\text{sen } \theta = m \left( \frac{\lambda}{a} \right)$$

donde  $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

Note que en esta expresión el valor  $m=0$  no está incluido pues corresponde a máximo central. Para hallar la intensidad de cualquier punto en el patrón de difracción de la ranura se puede utilizar un diagrama de fasores. Se encuentra que la intensidad presenta un máximo pronunciado en  $\theta=0^\circ$  y cae a cero a ciertos ángulos dados por la expresión anterior. Esto se ilustra en la figura siguiente:

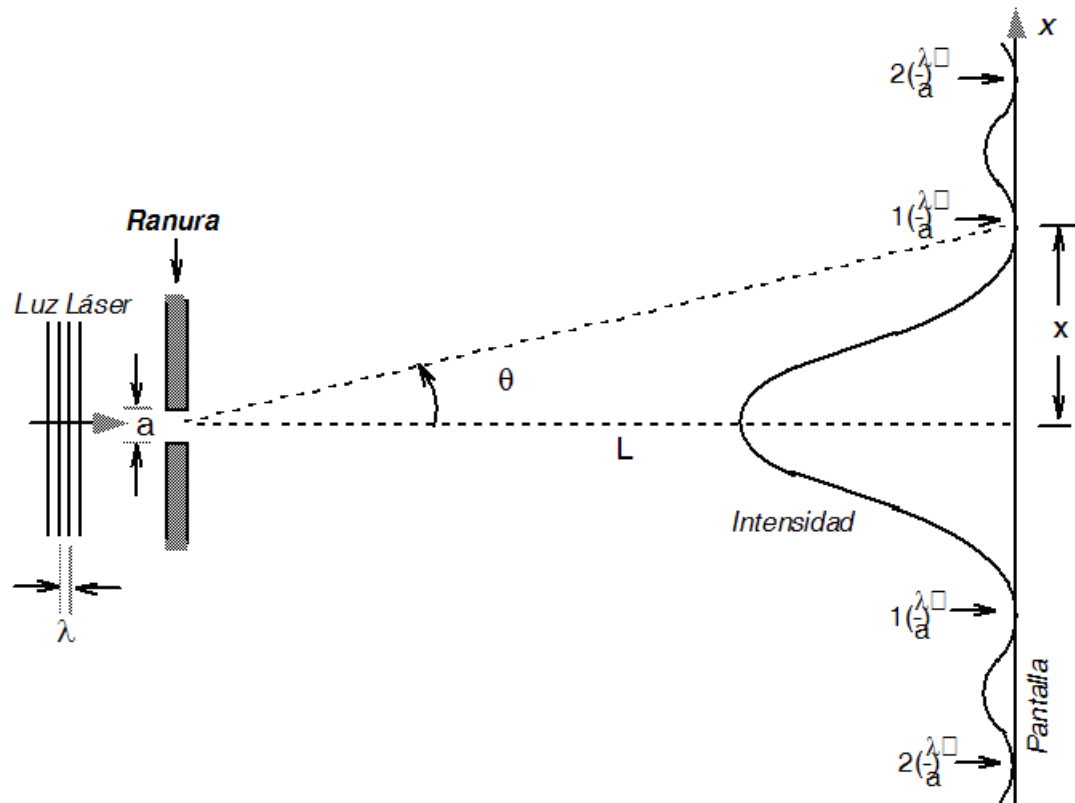


Figura 2. El patrón de difracción de una ranura

Entre los mínimos ocurren máximos brillantes más pequeños que resultan de interferencia destructiva incompleta. El ancho angular del pico central corresponde a los mínimos  $m = \pm 1$  en la relación anterior. Se observa que para una dada  $\lambda$  el pico central se ensancha a medida que la ranura se hace más estrecha.

### **B) Interferencia y difracción combinadas en una ranura doble.**

Supongamos ahora que se hace incidir luz sobre un par de ranuras de ancho "a" y separación "d". Si las ranuras fueran infinitamente estrechas, el pico de difracción debido a cada ranura se difunde sobre toda la pantalla y esta quedaría iluminada de manera uniforme por cada ranura individual. Si consideramos la interferencia de la luz coherente que proviene de las dos rejillas individuales resulta un patrón constituido por una serie de franjas brillantes y oscuras.

Las franjas brillantes ocurren a ciertos ángulos  $\theta$ , los cuales vienen dados por la condición:

$$\boxed{d \operatorname{sen} \theta = m\lambda} \quad \text{donde } m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (\text{máximos de interferencia})$$

Si las ranuras tienen un ancho "a" apreciable, la difracción reduce la intensidad de las franjas de interferencia a cada lado del centro. El patrón resultante se puede describir como una serie de máximos debidos a la interferencia de ondas provenientes de las dos ranuras, modificado por una envolvente resultado de la difracción de cada una de las ranuras. Esto se ilustra en la figura siguiente:

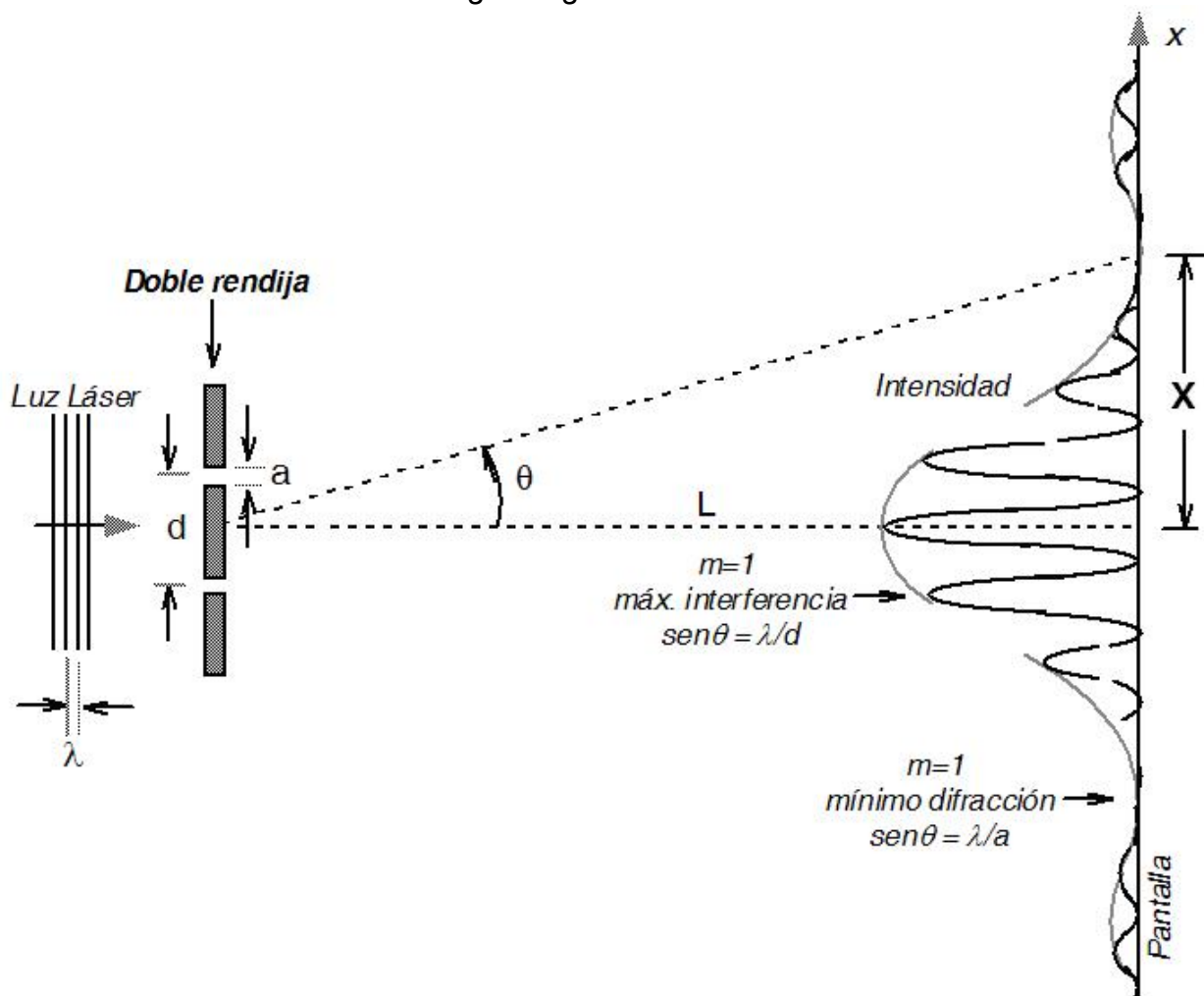


Figura 3. Interferencia y difracción de una ranura doble

Según indican las líneas punteadas el factor de difracción actúa como envolvente que limita los picos de interferencia.

$$\boxed{a \operatorname{sen} \theta = m\lambda} \quad \text{donde } m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (\text{mínimos de difracción})$$

Observe que para el caso que se ilustra el mínimo de difracción coincide con el con  $m = 4$  en el patrón de interferencia, por lo que el pico  $m = 4$  queda anulado.

### **C) Rejillas de difracción.**

En las rejillas de difracción las ondas son dispersadas por un número muy grande de centros ubicados a distancias regulares. Cualquier estructura periódica regular puede servir como una rejilla de difracción, de modo que las rejillas pueden adoptar muchas formas. Una es rayando regularmente placas opacas, para formar ranuras paralelas, las cuales funcionan como fuentes para la regeneración de ondas secundarias (rejilla de transmisión) Cuando las ralladuras se hacen en placas de metal trabajan como fuentes de luz reflejada y no transmitida (rejilla de reflexión). El análisis es básicamente el mismo para ambos tipos de rejillas

Supongamos un número muy grande de ranuras separadas por una distancia "d" y son lo suficiente estrechas de modo que la difracción de cada una de ellas difunda luz sobre una pantalla distante. Se producirá interferencia constructiva a ángulos  $\theta$  tales que los rayos de rendijas adyacentes recorran una distancia extra igual a  $m\lambda$ . Por lo tanto, debe cumplirse la condición:

$$\boxed{d \sin \theta = m\lambda} \quad \text{donde } m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (\text{picos rejilla de difracción})$$

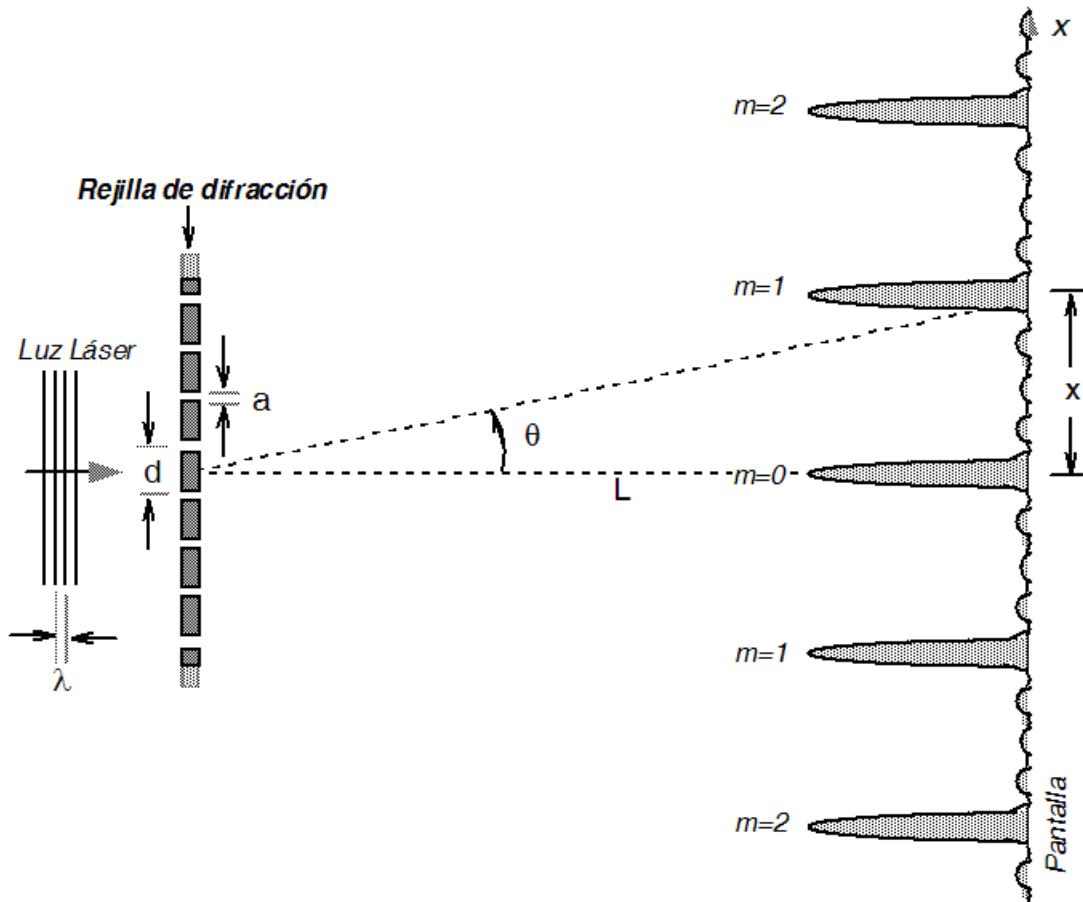


Figura 4. Espectro de una rejilla de difracción

Como muestra la figura, en las rejillas de difracción los picos resultan brillantes y nítidos, siendo el ancho del pico inversamente proporcional al número total de líneas en la rejilla.

## ACTIVIDAD PRELIMINAR

### Patrón de difracción de una rendija mediante fasores

La intensidad de cualquier punto en el patrón de difracción de la ranura sencilla se puede calcularse utilizando un diagrama de fasores. La rendija de ancho "a" se divide en N zonas y el campo eléctrico neto en un punto de la pantalla es la superposición de los N vectores del campo eléctrico teniendo en cuenta sus relaciones de fases. Demuestre, mediante este procedimiento, que la intensidad en función del ángulo  $\theta$  de difracción viene dada por:

$$I_{\theta} = I_m \left( \frac{\text{sen } \alpha}{\alpha} \right)^2$$

siendo

$$\alpha = \left( \frac{\pi a}{\lambda} \right) \text{sen } \theta$$

---

## PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

Los experimentos a ser realizados emplean un rayo láser de He-Ne como fuente de luz ( $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ ). Es muy importante que antes de empezar la práctica Ud. se familiarice con los principios de operación y características de este dispositivo (ver el apéndice A-2), y además tomes conciencia de que el láser debe tratarse con el debido respeto y precaución.



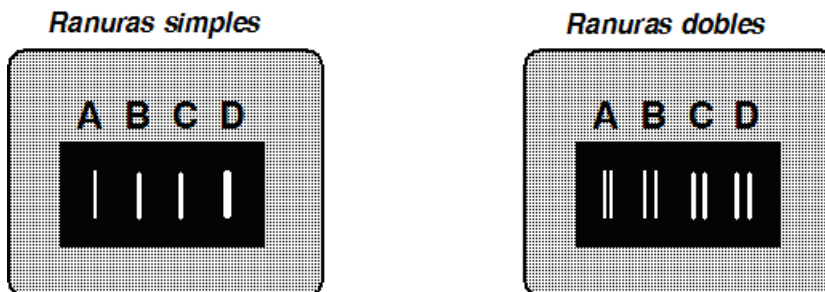
**LUZ LASER  
EVITE EXPONER DIRECTAMENTE SUS OJOS**

El láser puede producir lesiones en la retina, por lo tanto:

- 1) No mires directamente hacia la ventanita del laser (aún si está apagado)
- 2) No apuntes con el láser hacia los ojos de ninguna persona.
- 3) Trabaja con suficiente iluminación del laboratorio.
- 4) Coloque el láser pegado o muy cerca de la diapositiva o mosaico de difracción. De esta manera el reflejo del haz de luz láser pega directamente en el láser mismo y se evita que atraviese el laboratorio.

### A. Patrón de difracción de ranuras simples

Las ranuras y redes de difracción que utilizaremos están montadas en marcos de diapositivas. Estos se instalan en el banco óptico mediante una pinza que los sujeta por el borde inferior y deben tratarse con delicadeza para no dañarlos.



- A1.** Instale en el banco óptico el mosaico de ranuras simples a una distancia aproximada de 1 metro de la pantalla y gradúe la altura del láser para que el haz incida sobre la diapositiva a la altura de las ranuras.

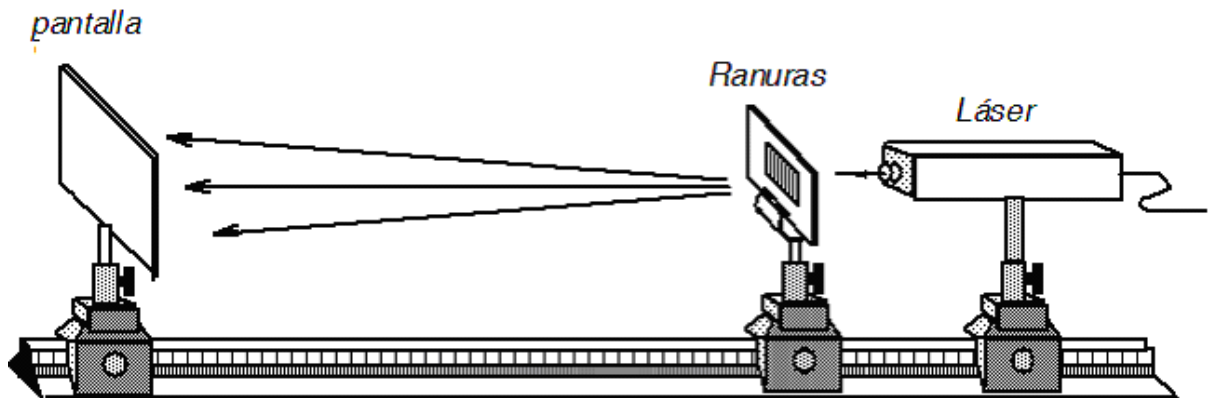


Figura 5. Montaje experimental.

- A2.** Seleccione una de las ranuras y observe el patrón de difracción que se forma sobre la pantalla. Coloque sobre la pantalla una hoja de papel blanco y dibuje cuidadosamente el patrón observado. Ponga especial cuidado en marcar precisamente los puntos donde la intensidad de la luz es un mínimo. Estime visualmente las intensidades relativas de las zonas iluminadas.
- A3.** Dibuje sobre este papel, a mano alzada, el patrón de intensidades observado. Su dibujo debe ser lo mas preciso posible y debe ser semejante a la parte del lado derecho de la Figura 2. Recorte y pegue estos patrones en su informe.
- A4.** Obtenga de la manera descrita en **A2** y **A3** el patrón de difracción que se forma con cada una de las ranuras de la diapositiva. Sobre sus dibujos mida cuidadosamente las separaciones " $\Delta x$ " entre el máximo central y los mínimos adyacentes (1er Mínimo  $m = 1$ , 2º Mínimo  $m = 2$ , ...). Repita lo anterior para todos los patrones obtenidos con las diferentes ranuras.

Ranura	ancho $a$ (m m)	Distancia entre mínimos $\Delta X$ (m)	Distancia Ranura - Pantalla. $L$ (m)	Long. onda calculada $\lambda$ (nm)	Error Long. onda calculada $\Delta\lambda$ (nm)	Error de $\lambda$ absoluto en %
A						
B						
C						
D						

- A5.** Para los diferentes anchos de ranuras calcule la longitud de onda  $\lambda$  (nm) del láser con su respectivo error. Compare el valor obtenido con el valor conocido para el láser He -Ne ( $\lambda=632,8$  nm.)

## **B. Interferencia y Difracción combinadas para ranuras dobles**

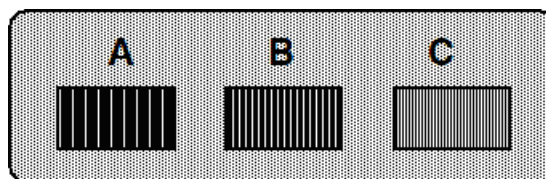
- B1.** Instale el mosaico que contiene las cuatro diferentes ranuras dobles y colóquelas a aproximadamente 1 metro de la pantalla.
- B2.** Observe el patrón correspondiente a cada una de las combinaciones de ranuras, y cuente el número de franjas de interferencia que están contenidas dentro de la envolvente correspondiente al máximo principal de difracción. Anote los valores en una tabla:

<i>Ranuras</i>	<i>Ancho a (m)</i>	<i>Separación d (m)</i>	<i>Nº franjas interfer. en máximo central de difracción (Experimental)</i>	<i>Nº franjas interfer. en máximo central de difracción (Teórico)</i>
A				
B				
C				
D				

- B3.** Si tiene tiempo, realice un dibujo de los patrones observados de manera análoga la parte **A3**
- B4.** Compare sus resultados con las predicciones teóricas.

## **C. Rejillas de Difracción**

- C1.** Instale el mosaico que contiene las tres rejillas de difracción.
- C2.** Haga incidir el láser en cada una de las rejillas. Mida la distancia entre franjas brillantes observadas y la distancia rejilla-pantalla.



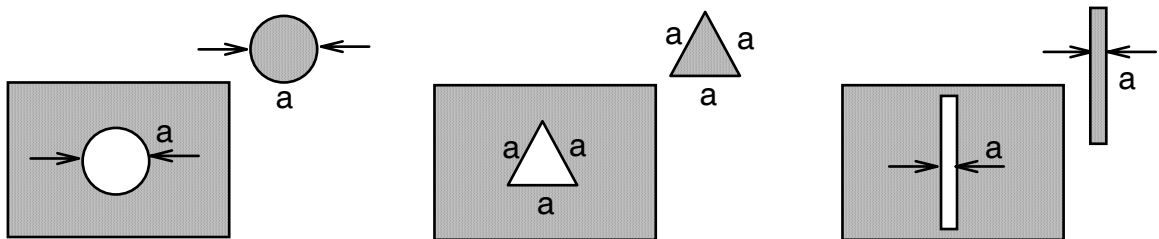
*Rejillas de difracción*

Rejilla	Número de ranuras por pulgada	Separación entre ranuras $d$ ( m )	Distancia entre franjas. $\Delta X(m)$	Distancia Red-Pantalla. $L$ ( m )	Long. onda calculada $\lambda(m)$
A	2400				
B	7500				
C	15000				

- C3.** Para los diferentes rejillas, calcule la longitud de onda  $\lambda$  (m) del láser con su respectivo error. Compare el valor obtenido con el valor conocido para el láser He - Ne ( $\lambda=632,8$  nm.)

### **D. Determinación del espesor de un cabello - El principio de Babinet**

De acuerdo al principio de Babinet la figuras de difracción producidas por dos objetos complementarios son idénticas. Se dice que dos objetos son complementarios si los espacios opacos de uno corresponden a espacios transparentes del otro (el negativo fotográfico). La demostración es simple y se basa en el principio de superposición y en que la intensidad es proporcional al cuadrado de la amplitud.



**Obstáculos complementarios**

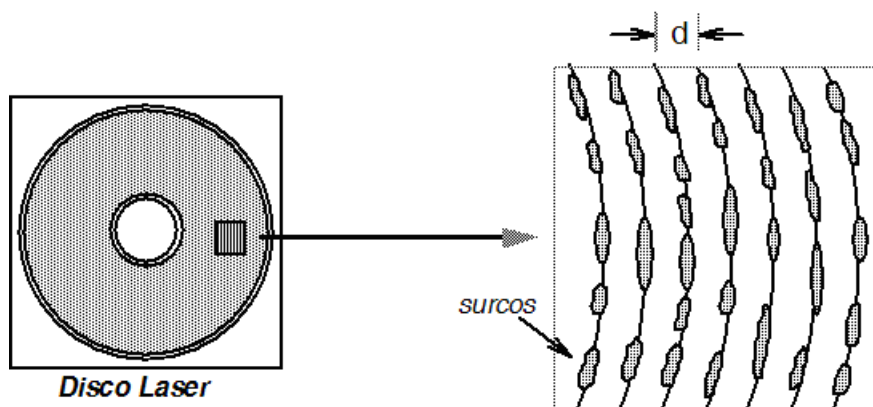
De acuerdo a este principio, el patrón de difracción de un alambre fino o un cabello que intercepta el haz del láser debe corresponder al de una ranura de igual anchura que el diámetro del cabello.

- D1.** Instale en el banco óptico, Figura 5, el portaobjetos que contiene un cabello. Alternativamente coloque una pinza con un cabello. Haga incidir el láser sobre el cabello y observe la figura de difracción en la pantalla.
- D2.** ¿Es la figura de difracción similar a la observada para la ranura simple, como lo asegura el principio de Babinet?
- D3.** Mida las distancias entre mínimos del patrón de difracción y la distancia cabello-pantalla de la manera descrita previamente. Sabiendo que el láser He-Ne tiene una longitud de onda  $\lambda=632,8$  nm, determine el grosor del cabello con su respectivo error.

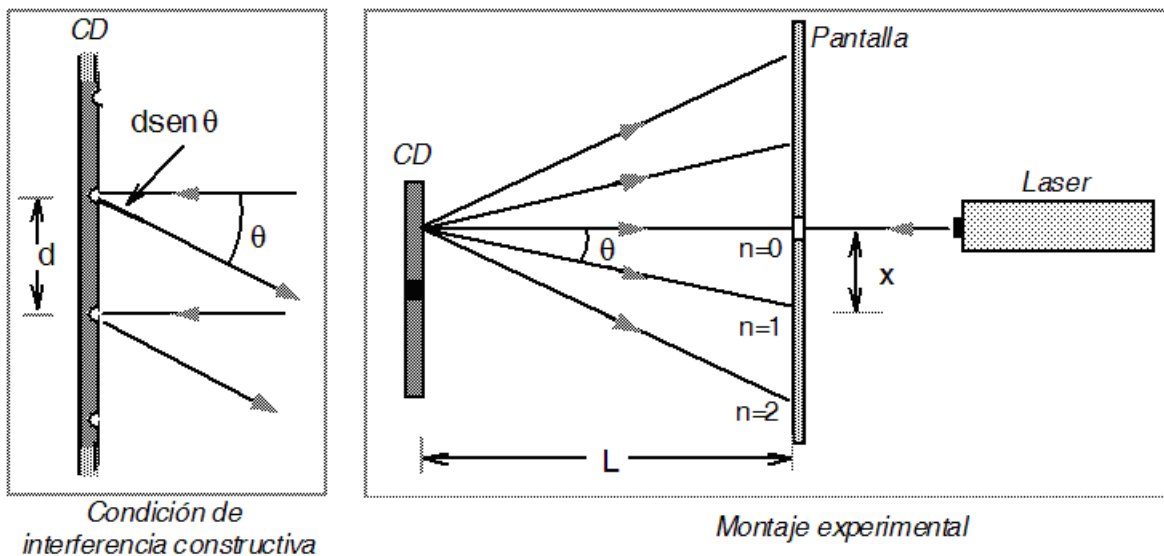
**D4.** Mida con el tornillo micrométrico el grosor del cabello. Coinciden las medidas? Compare la precisión de las dos determinaciones. Cual medida tiene mayor precisión?

**E. Determinación del número de surcos por mm en un disco compacto**

En los discos compactos de música, la información está codificada digitalmente en una capa metalizada con diminutos huecos de longitud variable, formando surcos en espiral alrededor del centro. La luz láser que se refleja a medida que el disco gira es detectada en un fotodiodo y luego demodulada para ser convertida en música.



Aunque los surcos no están continuamente rayados, la ocurrencias de los huequitos proveen una periodicidad suficiente para comportarse como una red de difracción por reflexión.



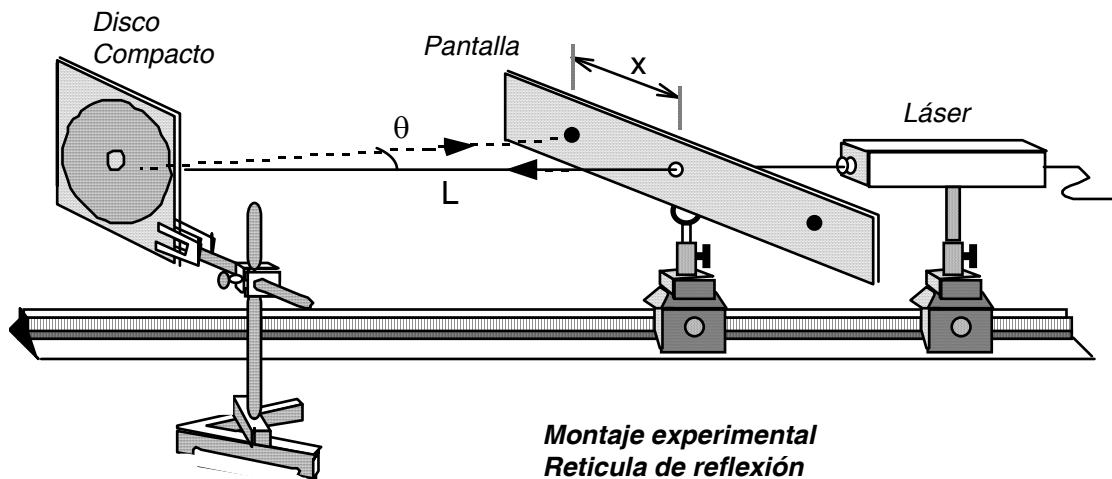
Si el láser incide normal a la superficie del disco, como indica la figura, los rayos reflejados producirá interferencia constructiva para ángulos " $\theta$ " tales que la diferencia

de camino de rayos adyacentes corresponda a un número entero de longitudes de onda:  $d \sin\theta = m\lambda$

Esto significa que las posiciones de los máximos de difracción que se producen en la pantalla están relacionados con la distancia "d" entre surcos mediante la fórmula.

$$d = m\lambda \sqrt{1 + \left(\frac{L}{x}\right)^2} \quad \text{donde } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

- E1.** Coloque la pantalla entre el láser y el disco compacto de forma que el haz pase por el agujero de la pantalla e incida sobre el disco. Ajuste la posición del disco de modo que el haz incida perpendicular a su superficie, en una línea diametral horizontal y el haz reflejado de orden cero ( $m = 0$ ) quede en la misma dirección de incidencia.
- E2.** Mida la distancia entre el disco a la pantalla y las posiciones de los máximos de difracción respecto del centro de la pantalla.
- E3.** Para los dos órdenes diferentes ( $m = 1$  y  $m = 2$ ), determine la distancia "d" entre surcos con su respectivo error. ¿Cuántos surcos hay en un mm diametral del disco? El número de surcos por milímetro se lo llama la "constante de la red"



## Preguntas

1. ¿Cuáles requisitos debe cumplirse para que el máximo central de la envolvente del patrón de interferencia de la doble ranura contenga exactamente un número N de franjas?, ¿Dependerá de la longitud de onda  $\lambda$ ?
2. ¿Cuál de las determinaciones de la longitud de onda del láser es más precisa, mediante ranuras simples o mediante las rejillas de difracción?. ¿por qué?

3. Explique cómo se podría determinar la longitud de onda del láser utilizando una únicamente una regla metálica graduada?
4. Explique por qué se observa una diversidad de colores en la superficie de los discos compactos de música (CD).
5. ¿Por qué es más dañino mirar al láser directamente que mirar al sol?  
¿es acaso más potente la luz del láser que la del sol?  
¿es acaso más intensa la luz del láser que la del sol?

## ***Referencias***

- E. Hecht y A. Zajac, *Optica*, Caps. 9 y 10, Fondo Educativo Interamericano SA (1977).
- D. Halliday, R. Resnick y K. Krane, *Física*, Vol. 2, Caps.46,47, Ed. Continental (1995)
- R. A. Serway, *Física*, Tomo. 2, Tercera edición, Caps. 37,38, Mc. Graw- Hill (1992).
- P. A. Tipler, *Física*, Tomo. 2, Segunda edición, Caps. 34, Editorial Reverté (1985).

# PRACTICA DE LABORATORIO III-09

---

## LOS ANILLOS DE NEWTON

### OBJETIVOS

1. Medir la longitud de onda de una fuente monocromática a partir del análisis de los anillos de Newton generados por una lente de curvatura conocida.
2. Determinar el radio de curvatura de una lente a partir del análisis de los anillos de Newton.

### MATERIALES

1. Lámpara de mercurio. Con red de difracción.\*
2. Microscopio.
3. Placa divisora de haces.
4. Lentes plano-convexas de gran distancia focal.
5. Vidrio plano.
6. Micrómetro ocular.
7. Lentes colimadoras.
8. Bases y soportes ópticos.
9. Cámara WebCam
  - Las longitudes de onda de las líneas del espectro de mercurio están en la p. III-12.

### TEORIA

*Antes de la realización de esta práctica Ud. deberá repasar la teoría referente a la óptica geométrica, los conceptos de distancia focal, radio de curvatura de una lente y la relación con la distancia focal mediante la ecuación del fabricante de lentes. Igualmente Ud. deberá repasar los conceptos de la óptica física, frecuencia, longitud de onda e interferencia de ondas.*

Los anillos de Newton son el resultado de un fenómeno de interferencia que surge cuando una lente de gran radio de curvatura se coloca sobre una superficie plana pulida que refleje la luz, un espejo por ejemplo. Entre la superficie de la lente y la superficie del plano se establece una interfaz de ancho variable definida por la curvatura de la lente. Si un haz de luz plano y coherente incide sobre el sistema descrito, éste se reflejará sobre la superficie curva de la lente y sobre la superficie del plano paralelo. La interferencia de los dos haces reflejados da origen a una estructura de anillos concéntricos de ancho decreciente. En el punto de contacto entre la lente y la superficie plana se observa un punto oscuro o mínimo de interferencia debido al cambio de fase en  $\pi$  que experimenta el

haz al ser reflejado por la superficie plana. Tal patrón de interferencia ha sido conocido con el nombre de anillos de Newton, en honor a Isaac Newton quien fuera el primero en reportar el efecto.

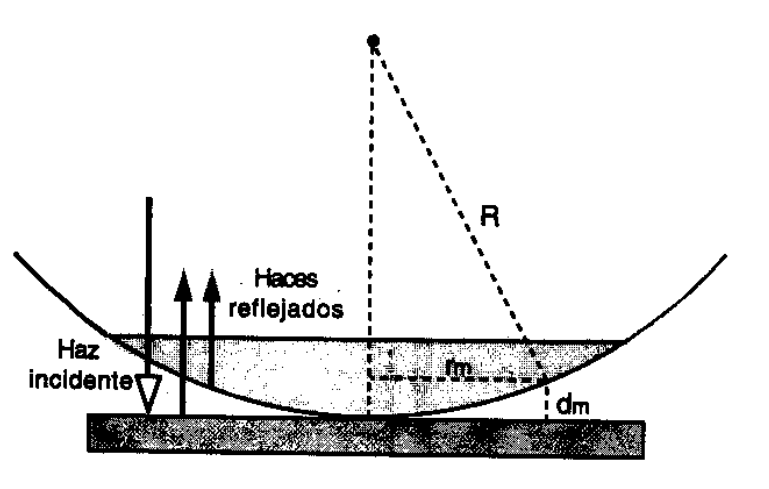


Figura 1. Sistema simplificado para la observación de los anillos de Newton.

En la Figura 1 se muestra un sistema simplificado para la observación de los anillos de Newton. Una lente con radio de curvatura  $R$  se coloca sobre una superficie reflectora o espejo. La luz reflejada por el espejo interfiere con la luz reflejada por la cara curva de la lente dando origen a los anillos de interferencia con franjas oscuras y claras de ancho decreciente. Para un determinado punto sobre la superficie de la lente, la diferencia de camino entre ambos haces, incidente y reflejado, corresponde a dos veces la altura  $d_m$  de la capa de aire entre la lente y el espejo. Entonces la diferencia de fase entre las dos ondas puede ser escrita como

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} 2d_m + \pi \quad (1)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz incidente. El término  $\pi$  adicional escrito a la derecha de la ecuación (1) es debido a la reflexión en el espejo que corresponde a una reflexión en incidencia normal desde un medio menos denso ópticamente (aire) a otro más denso (material del espejo). Si  $r_m$  es el radio de una franja oscura a la cual corresponde la altura  $d_m$  y  $R$  es el radio de curvatura de la lente, de la Figura 1 no es difícil obtener la relación

$$r_m^2 = R^2 - (R - d_m)^2 \quad (2)$$

Teniendo en cuenta que el radio de curvatura  $R$  de la lente es mucho mayor que la distancia  $d_m$ ,  $R \gg d_m$ , se puede afirmar con una buena aproximación que

$$r_m^2 \approx 2Rd_m \quad (3)$$

Como ejercicio de cálculo, recomendamos al lector que llegue por sí mismo a esta última expresión.

Las franjas oscuras se observarán cuando la diferencia de fase entre los dos haces que interfieren sea un número impar de  $\pi$ , Es decir, cuando se cumpla

$$2d_m + \frac{\lambda}{2} = (2m + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (4)$$

donde m es el orden del anillo oscuro de radio  $r_m$ . Combinando las ecuaciones (3) y (4) obtenemos:

$$\lambda = \frac{r_m^2}{mR} \quad (5)$$

La ecuación (5) permite estimar la longitud de onda incidente si se conoce el radio de curvatura, midiendo los radios de los diferentes anillos oscuros o claros. Igualmente puede ser utilizada para determinar el radio de curvatura de una lente dada si  $\lambda$  es conocida.

En la Figura 2 se muestra una fotografía de los anillos de Newton obtenidos con luz monocromática. Si la luz incidente no es monocromática sino blanca, entonces en lugar de anillos claros y oscuros, se observarán anillos coloreados.

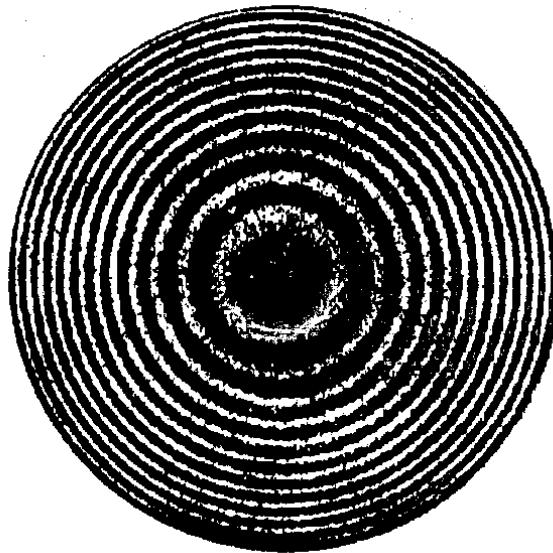


Figura 2. Fotografía de los anillos de Newton obtenidos con luz monocromática.

## ACTIVIDADES PRELIMINARES

- a) Se utiliza un dispositivo de formación de anillos de Newton que está constituido por una superficie plana y una lente plano convexa de radio  $R = 4 \text{ m}$ . Si se utiliza luz monocromática proveniente de un láser de He-Ne ( $\lambda = 632 \times 10^{-9} \text{ m}$ ), ¿cuáles serán los radios de los cinco primeros anillos?
- b) Si en el dispositivo anterior se utiliza la luz de dos fuentes con longitudes de onda  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ , siendo  $\lambda_2 > \lambda_1$  los anillos aproximadamente coinciden en el centro pero su visibilidad disminuye a medida que nos alejamos de él. En un punto los anillos oscuros generados por la luz con longitud de onda  $\lambda_1$  se superponen a los anillos claros generados por la luz de longitud de onda  $\lambda_2$ . ¿En qué punto se observa inicialmente ese fenómeno?
- c) El anillo central es un anillo oscuro que corresponde a  $m = 0$ . Sin embargo, si agregamos un líquido con un índice de refracción  $n$  superior al del material del espejo, el anillo central se hace claro. ¿Cómo se explica éste fenómeno? ¿Cuál será en este caso la condición para los mínimos o franjas oscuras?

## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En la Figura 3 se presenta el sistema para la observación y estudio de los anillos de Newton. La luz proveniente de una lámpara de mercurio se descompone por medio de una red de difracción para generar una luz relativamente monocromática se dirige a una

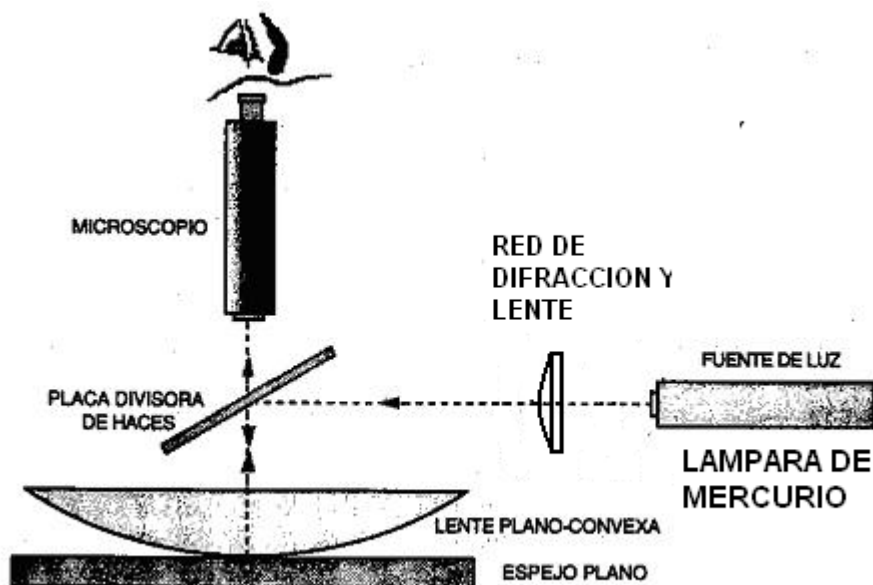


Figura 3. Montaje experimental.

placa de vidrio que funciona como un divisor de haces. Esta placa dirige hacia abajo el haz de luz para lograr una incidencia perpendicular sobre el sistema formado por un vidrio plano y una lente plano-convexa. La luz reflejada por este sistema vuelve a la placa divisora de haces, la atraviesa y se propaga hasta un microscopio situado encima de ésta. El microscopio permite la observación directa de los anillos de Newton. Este microscopio posee una escala micrométrica que permite medir el radio de los anillos. (VER MAS ABAJO)

Se realizarán dos tipos de experimentos. En el primer tipo se determinará el radio de curvatura de la lente a partir de la longitud de onda previamente conocida. En el segundo tipo de experiencias a partir de una lente con distancia focal determinada previamente se medirá la longitud de onda de la luz incidente. Para lograr estos objetivos se medirán los radios de 10 anillos consecutivos. Luego se graficará el cuadrado del valor de los radios de estos anillos  $r_m^2$  en función del número  $m$ . La pendiente de la recta obtenida dará la magnitud  $R\lambda$  ver ecuación (5), que permitirá determinar  $\lambda$  si se conoce  $R$  o viceversa. Otra forma de medir la longitud de onda o el radio de curvatura, según sea el caso, es determinando el ancho de los anillos claros fuera del centro del patrón de interferencia.

Los radios de dos anillos oscuros consecutivos son  $r_m^2 = Rd_m$  y  $r_{m+1}^2 = Rd_{m+1}$  si restamos estas dos ecuaciones y tenemos en cuenta que  $r_m \approx r_{m+1}$  y  $\Delta r = r_{m+1} - r_m$  donde  $\Delta r$  es el ancho de los anillos claros, tendremos que

$$\lambda = \frac{2r_m \Delta r}{R} \quad (6)$$

Para la medida se hará uso de una cámara digital tipo WEBCAM marca GENIUS la cual se coloca sobre el microscopio, se tomarán fotografías de los anillos de Newton y las medidas de los anillos se realizarán sobre las fotografías en la HP TABLET PC . También es posible tomar las fotos con un teléfono inteligente con cámara, pasar la foto a una PC y hacer las medidas con PAINT. (ver el punto 3. mas abajo)

### **La alineación en todo sistema óptico es MUY IMPORTANTE.**

Observe cuidadosamente las imágenes.(figura 3 y 4). Reconozca el microscopio y sus partes, el tornillo de enfoque, el lente ocular y el objetivo (lente inferior del microscopio). Reconozca la placa divisora de haces. Esta es una placa de vidrio que debe estar a 45 grados de manera de reflejar un haz horizontal incidente en un haz vertical hacia abajo. Reconozca el "espejo plano" que es en realidad un portaobjetos transparente de vidrio. El portaobjeto debe reflejar la luz que le llega, verticalmente hacia arriba y esta debe entrar en el microscopio (Como muestra la figura 3). Ese ajuste se logra mediante los dos tornillos que controlan el nivel de la mesa donde está el portaobjetos. Encima del portaobjeto se coloca una lente con su superficie convexa hacia abajo. Los anillos de Newton se van a formar en el punto de contacto. El punto de contacto debe estar en el centro del punto de foco del microscopio. (Como muestra la figura 3).

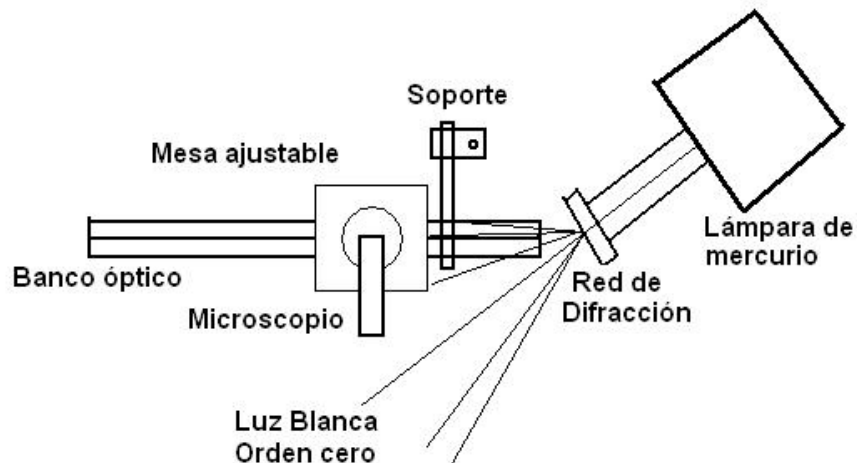


Figura 4. Vista **superior** del montaje para observar los anillos de Newton

## 1.- Alineación

1.1.- Coloque un trocito de papel milimetrado (de 2 x 2 cm.) debajo de la lámina de vidrio (portaobjeto) de forma de que las líneas de este papel se vean a través del microscopio. Estas líneas se usarán como escala de calibración. Enfoque el microscopio en las líneas de ese papel en su centro.

1.2.- Encienda la lámpara de mercurio. Tarda varios minutos en calentarse.

1.3.- Alinee la lámpara de mercurio como en la Figura 4, de manera que la red de difracción esté alineada al banco óptico y la luz incida **paralela** al banco óptico. La luz de la lámpara debe pegar en el centro de la “placa divisora de haces” iluminando el centro del papel milimetrado. Para eso es necesario alinear la placa divisora de haces. (Son dos (2) ejes que hay que ajustar<sup>1</sup>)

1.4.- Alinear la mesa con los tornillos de ajuste de manera que el haz reflejado entre verticalmente en el microscopio. Esto se logra mirando por el microscopio y observando la iluminación del campo visual. El ajuste es óptimo cuando se logra un máximo en la iluminación del campo visual.

1.5.- Una vez realizados los pasos 1 - 4 anteriores, colocar la lente sobre el portaobjetos con el punto de contacto en el centro del campo visual. Busque hasta observar los anillos de Newton. Los anillos se ven más claramente con lentes de POCA curvatura. Una vez que se observen visualmente los anillos intenten OPTIMIZAR la imagen en el microscopio. Luego se procede a colocar sobre el ocular la cámara WEBCAM.

## 2.- Uso de la cámara WEBCAM GENIUS

2.1.- Coloque la cámara sobre la mesa. Conecte la cámara a la HP TABLET PC por el puerto USB y proceda a ejecutar el programa VideoCAM Look (Icono en el ESCRITORIO de la PC) Familiarícese con el programa. (El icono con un hombrecito corriendo es para CERRAR el programa. El icono con herramientas abre una ventana de control de la cámara. Normalmente no es necesario modificar esto) Observe la imagen de la cámara

<sup>1</sup> Estrictamente son tres (3) ejes que se deberían ajustar, pero el tercer eje es fijo en la base de soporte usada.

en la pantalla de la HP TABLET PC y familiarícese con la toma de fotografías. La lente de la cámara se puede girar para enfocar la imagen. No gire la lente más de una o dos vueltas en ambos sentidos. Hay dos formas de tomar fotos. A.- Pisando el botón que está **sobre** la cámara. Y B.- Mediante la ventana del software de la cámara en la pantalla de la HP TABLET PC: Para tomar una foto haga clic sobre el icono que representa una cámara. **El método A es el más conveniente** ya que al tomar la foto se observa la fotografía obtenida en la pantalla. Si la foto es mala se borra la ventana con la foto, si la foto es buena se puede guardar (File, Save as..., en la ventana con la foto) Escoja donde guardar y con que nombre. Guarde sus fotos en la carpeta ESTUDIANTES que se encuentra en el ESCRITORIO)

Con el método B, al tomar la foto se observa momentáneamente la fotografía en la pantalla. Luego el programa continúa con una vista de los objetos frente a la lente de la cámara. Al tomar una fotografía por el método B se crea un documento el cual el programa coloca en una carpeta del directorio de WINDOWS. La carpeta se llama ALBUM.

Use el explorador de Windows para ubicar esta carpeta y ver los documentos creados cada vez que se toman fotos. El programa les pone nombres secuenciales a las fotos tomadas por el método B. Como ejercicio: tomen una foto de los miembros del grupo y la guardan con su nombre.

2.2.- A la cámara se le ha adicionado un tubo oscuro que calza exactamente sobre el ocular del Microscopio. **Advertencia:** Manipule la cámara por el tubo oscuro. Sea cuidadoso en la manipulación de la cámara y del microscopio de manera de no dañar ninguno de los componentes y de no desalinearse el microscopio durante la manipulación.

Coloque la cámara sobre el ocular del microscopio mientras observa la imagen (El tubo calza ajustadamente). Proceda a enfocar la imagen de los anillos de Newton. El enfoque se puede hacer manipulando diversos elementos: A.-Subiendo y bajando la cámara sobre el ocular, B.- Mediante el tornillo de enfoque del microscopio. La estrategia recomendada es enfocar bien el microscopio antes de colocar la cámara. Una vez colocada la cámara el enfoque con el tornillo de enfoque del microscopio es apenas un pequeño ajuste. Deberá alinear y enfocar cuidadosamente la cámara hasta obtener una buena imagen de los anillos de Newton en la pantalla. Cuide que sean visibles el mayor número posible de anillos. El posicionamiento de la cámara sobre el ocular del microscopio es crítico y es el más importante para obtener una imagen.

2.3.- Tome fotografías de los anillos bajo diversas condiciones de iluminación: Con la luz verde y amarilla de la lámpara de mercurio<sup>2</sup>. Cuide que se observen en las fotos, no solo los anillos, sino también las líneas del papel milimetrado que está colocado debajo de la lámina de vidrio. Estas líneas se observan cuando el papel milimetrado está iluminado con luz ambiental (encienda luces o alumbre con una linterna). Puede tomar una foto del papel milimetrado separadamente con fines de calibración.

2.4.- **Tomar las fotos con un Teléfono inteligente.** Es posible tomar las fotos alineando manualmente el teléfono con el ocular del microscopio hasta poder observar los anillos. Trate de mejorar las fotos moviendo el tornillo de enfoque del microscopio y la posición del teléfono.

---

<sup>2</sup> Las longitudes de onda de las líneas de la lámpara de mercurio se encuentran en una tabla de la guía de Efecto Fotoeléctrico.

### 3.- Procedimiento de medida de los anillos de Newton.

Para la medida de los diámetros o radios de los anillos se utilizan dos programas: Para la medida se utiliza el PAINT, y para la toma de datos y análisis el EXCEL. La manera mas conveniente de hacer la medida y toma de datos es el abrir **los dos programas** y ajustar las ventanas de manera de ver simultáneamente las ventanas de ambos programas.

3.1.- Proceda a abrir los programas PAINT y EXCEL y ajuste los tamaños de las ventanas para ver los dos programas a la vez.

3.2.- Abra una de las imágenes de los anillos mediante el programa PAINT. Observe que al mover el cursor sobre la imagen hay un indicador numérico de coordenadas que cambia de acuerdo a la posición del cursor. El primer número da la posición horizontal en PIXELS, el segundo número da la posición vertical en PIXELS.

3.3.- Active el programa EXCEL y prepare su tabla de datos: Una tabla para hacer la calibración de milímetros a PIXELS y una tabla de “Número del anillo” y “radio del anillo”.

3.4.- Observe que aun cuando el programa EXCEL esté activo, cuando se mueve el cursor sobre la imagen en el programa PAINT, el indicador numérico de las coordenadas varía de acuerdo a la posición. Esto permite hacer las medidas de los anillos y escribir los valores de las coordenadas, en PIXELS en la tabla EXCEL sin necesidad de activar la ventana del programa PAINT.

3.5.- Proceda a tomar los datos necesarios para hacer una curva de calibración de Milímetros en función de PIXELS (Grafique 0, 1, 2, 3, 4, ..., mm en función de los PIXELS indicados)

3.6.- Proceda a tomar datos para determinar los radios de los anillos. Deberá medir un mínimo de 10 anillos.

### 4.- Procedimiento de análisis de los datos.

4.1.- Haga un gráfico de calibración de Milímetros en función de PIXELS. Haga un ajuste lineal de los datos y obtenga la ecuación de la curva que representa el mejor ajuste así como el coeficiente de correlación.

4.2.- Utilice la ecuación derivada en el paso anterior para convertir las medidas de los anillos de PIXELS a milímetros.

4.3.- Si lo desea, podrá imprimir las imágenes obtenidas de los anillos de Newton.

Para esto deberá manejar cuidadosamente el software de impresión de manera de obtener una imagen de tamaño apropiado. **Importante:** Antes de ordenar la impresión, vea la “Imagen Preliminar” y modifique los márgenes o escalas apropiadamente hasta que la imagen represente lo deseado.

## **A. Determinación del radio de curvatura de una lente a partir del análisis de los anillos de Newton**

**A1.** Seleccione la luz amarilla de la fuente y observe los anillos de Newton correspondientes para la lente problema.

**A2.** Mida el radio de 10 anillos consecutivos y el ancho de las franjas claras para 5 anillos de orden superior a 10, al igual que sus radios.

**A3.** Grafique el cuadrado del radio de los anillos en función de  $m$ . Determine la constante  $R\lambda$ . Del valor de  $\lambda_{\text{amarillo}}$  tabulado, determine el radio de curvatura de la lente problema con su respectivo error absoluto.

## **B. Medida de la longitud de onda a partir del análisis de los anillos de Newton**

**B1.** Seleccione la luz verde de la lámpara de mercurio. Ajustando si es necesario el sistema óptico. La lente a utilizar debe ser la utilizada en la sección anterior o de radio de curvatura conocido (Si este radio se conoce). Observe a través del microscopio los anillos de Newton.

**B3.** Mida los radios de al menos 10 anillos consecutivos. Para mayor precisión, con la imagen centrada, mida el radio de cada anillo arriba del centro de la imagen y debajo de ésta o del lado derecho e izquierdo del centro. Realice un promedio de cada medida.

**B3.** Para anillos de orden superior a 10, mida el ancho de los anillos claros al igual que el radio de los anillos correspondientes. Realice al menos 5 medidas de este tipo.

**B4.** (Optativo) Seleccione ahora alguna otra línea de la fuente de mercurio y repita los pasos anteriores.

**B5.** Grafique el cuadrado del radio de todos los anillos medidos en función del número  $m$ . De la pendiente de esta curva determine la magnitud de la longitud de onda para el tipo de luz.

**B6.** Con los datos del ancho de los anillos claros  $\Delta r_m$  y sus respectivos radios  $r_m$  determine, luego de promediar, las longitudes de onda de los colores utilizados, con sus respectivos errores absolutos. Compare con los resultados obtenidos en **B5**, en términos de aplicabilidad del método, aproximaciones en la teoría, complejidad de análisis, precisión y exactitud.

**B7.** Haga una tabla comparativa de las longitudes de onda obtenidas con sus errores y de los valores tabulados. Indique la diferencia porcentual y comente sobre la bondad de sus resultados.

## **PREGUNTAS**

1.- La teoría de los anillos de Newton se ha construido para lentes de radios de curvatura grande. ¿Qué dificultades tendría esta teoría para lentes de radios pequeños?

2.- Los anillos de Newton también pueden ser observados con luz blanca. En este caso se observan anillos coloreados concéntricos y un centro oscuro. El radio de un anillo verde, ¿será mayor o menor que el radio de un anillo rojo?

3.- En el análisis presentado se ha supuesto que los anillos de Newton se forman sobre la superficie de la lente, lo cual constituye en realidad una aproximación. Dibuje un esquema de haces que incidan sobre el sistema lente-espejo y determine cualitativamente la localización correcta de los anillos de Newton (consultar por ejemplo la Referencia 5).

## **REFERENCIAS**

1. R. Resnick, D. Halliday y K. Krane, *Física*, Vol. II, Ed. Continental (1995).
2. P. A. Tipler, *Física*, Vol. II, Editorial Reverté (1985).
3. R. Eisberg y lo lemer, *Física, fundamentos y aplicaciones*, Vol. II, Ed. Mac Graw-Hill Latinoamericana (1984).
4. R. Annequin y J. Boutigny, *Curso de ciencias físicas, Óptica II*. Editorial Reverté, S.A. (1978).
5. E. Hecht y A. Zajac, *Óptica*, capítulos 9 y 10, Fondo Educativo Interamericano (1977).

# PRACTICA DE LABORATORIO III-10

## ESPECTROSCOPIA

### OBJETIVOS

- Utilizar un goniómetro como espectroscopio de red.
- Calibrar el espectroscopio con las líneas de emisión de elementos conocidos.
- Medir con el espectrómetro las líneas de emisión de elementos desconocidos.
- Identificar los elementos suministrados a partir sus líneas de emisión.
- Determinar las características de la red de transmisión utilizada.

### MATERIALES

1. Goniómetro.
2. Red de transmisión.
3. Tubos de descarga de diferentes elementos.

### TEORIA

#### *1. Introducción*

La luz visible representa una estrecha banda del espectro electromagnético que cubre un rango de longitudes de onda entre, 780 nm y 380 nm (7.800 Å y 3.800 Å) rango dentro del cual es sensible el ojo humano. La emisión o absorción de radiación electromagnética por parte de átomos y moléculas, en este rango del espectro electromagnético, está asociada con transiciones entre niveles de energía de los electrones más exteriores al núcleo. La longitud de onda de la radiación emitida (o absorbida) depende de la diferencia de energía de los niveles entre los cuales se mueve el electrón, y la intensidad para una frecuencia particular está asociada con la probabilidad de que esa transición se produzca. El conjunto de longitudes de onda que un átomo es capaz de absorber o emitir es característico de cada átomo y se utiliza como una "huella digital" para la identificación de materiales. De hecho, la técnica que vamos a estudiar en esta práctica es utilizada con instrumentos más sofisticados, para la clasificación y estudio de estrellas y galaxias a través de la determinación, por medio de sus espectros, de la composición estelar o galáctica. También es la base de modernos instrumentos, aparatos tales como el Plasma Inductivo

Acoplado (ICP) o de Absorción Atómica (AA) que son la base de la moderna química analítica que permiten determinar la composición química de los materiales sólidos y líquidos.

El análisis teórico del espectro de emisión o absorción de un átomo o molécula puede ser muy complicado, y lo que se hace en general es determinarlo experimentalmente. Existe un grupo de átomos para los cuales las predicciones teóricas a partir de modelos simples son posibles. Dentro de este grupo se encuentra el hidrógeno, para el cual el espectro (atómico) es relativamente sencillo, y las longitudes de onda asociadas con las transiciones localizadas de su único electrón en la región visible siguen la relación:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad \text{con } n = 3, 4, 5, \dots \quad (1)$$

El término  $R_H$  se conoce como constante de Rydberg para el hidrógeno. Esta ecuación fue deducida empíricamente por el físico Johann Balmer. El número  $n$  está asociado con la diferencia entre estados de energía (teniendo como referencia el nivel  $n = 1$ ), y el conjunto de líneas correspondientes a estas transiciones se conoce como serie de Balmer.

## II. Tipos de espectros

Los espectros más sencillos corresponden a átomos individuales en estado gaseoso a baja presión. En estos sistemas se desprecia cualquier interacción externa al átomo, y los espectros en este caso son típicamente líneas finas, asociadas con transiciones entre niveles electrónicos de energía del átomo que da lugar a una longitud de onda particular. El próximo grado de complicación aparece en gases diatómicos o moleculares, en los cuales, además, hay que considerar los niveles de energía vibracionales y rotacionales de la molécula. Estos espectros típicamente aparecen con muchas líneas muy próximas entre sí, formando lo que se conoce como espectros de bandas. Cada banda está asociada con algún modo vibracional de la molécula. En materiales sólidos o líquidos, los espectros que se observan son de tipo continuo, con una distribución de intensidades que depende de la temperatura del material.

Los espectros de líneas, característicos de sustancias en estado gaseoso, pueden ser de emisión o absorción, dependiendo de cómo se excita el gas. Supongamos que disponemos de una fuente luminosa lo suficientemente intensa como para producir las transiciones electrónicas en la región visible del espectro de un gas dado (figura 1). El espectro producido por el electrodo incandescente de la fuente es continuo (observador en C, figura 1). Al atravesar el gas esta radiación ocurre que, de todas las longitudes de onda emitidas por la fuente, la sustancia gaseosa sólo absorbe aquellas cuya energía sea igual a la que requiere el electrón para pasar de un nivel a otro. Esas longitudes de onda absorbidas (fotones) son posteriormente emitidas por los átomos en todas direcciones. Un observador en S (figura 1) verá el espectro continuo proveniente de L con una serie de líneas oscuras en las longitudes de onda que absorbió el gas. Este tipo de espectro se conoce como *espectro de absorción*, y las líneas oscuras se deben a que, al emitir el átomo nuevamente los fotones en todas direcciones, el número de fotones que llegan a S, para estas longitudes de onda particulares, es mucho menor que para el resto de la radiación, apareciendo en los espectros como líneas oscuras.

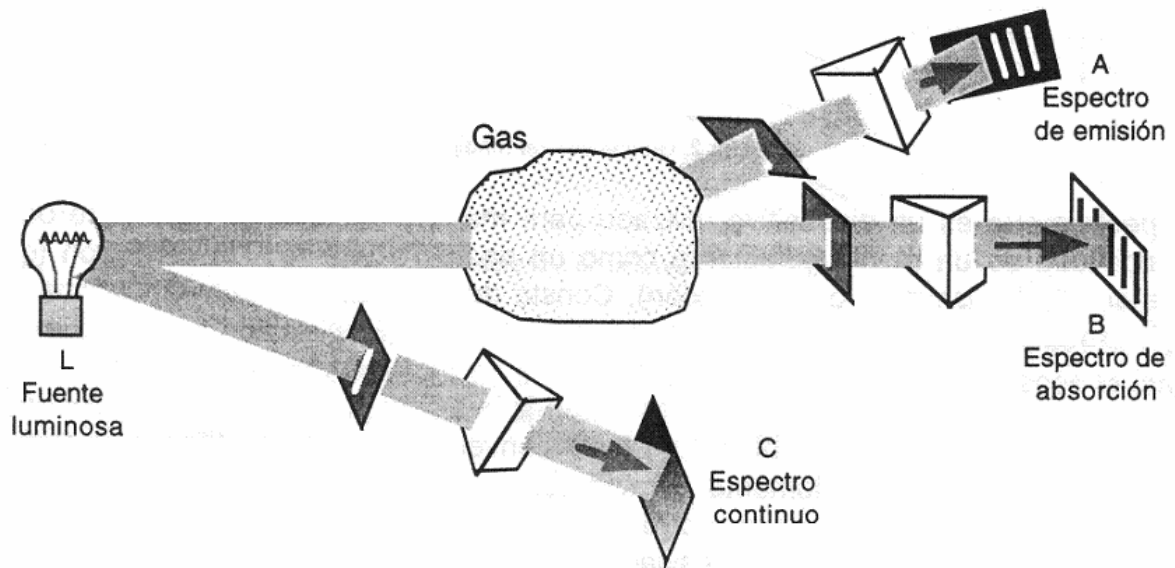


Figura 1. Tipos de espectros producidos en un gas

Si por el contrario nos ubicamos en A, vamos a ver una fracción de los fotones que emiten los átomos en todas direcciones luego de ser excitados por L y el espectro en este caso aparece como un conjunto de líneas brillantes sobre un fondo negro. Este espectro se conoce como *espectro de emisión*. Cabe señalar que tanto las líneas oscuras que se observan en B como las luminosas en A corresponden entre sí a las mismas longitudes de onda, es decir, coinciden en su posición en el espectro.

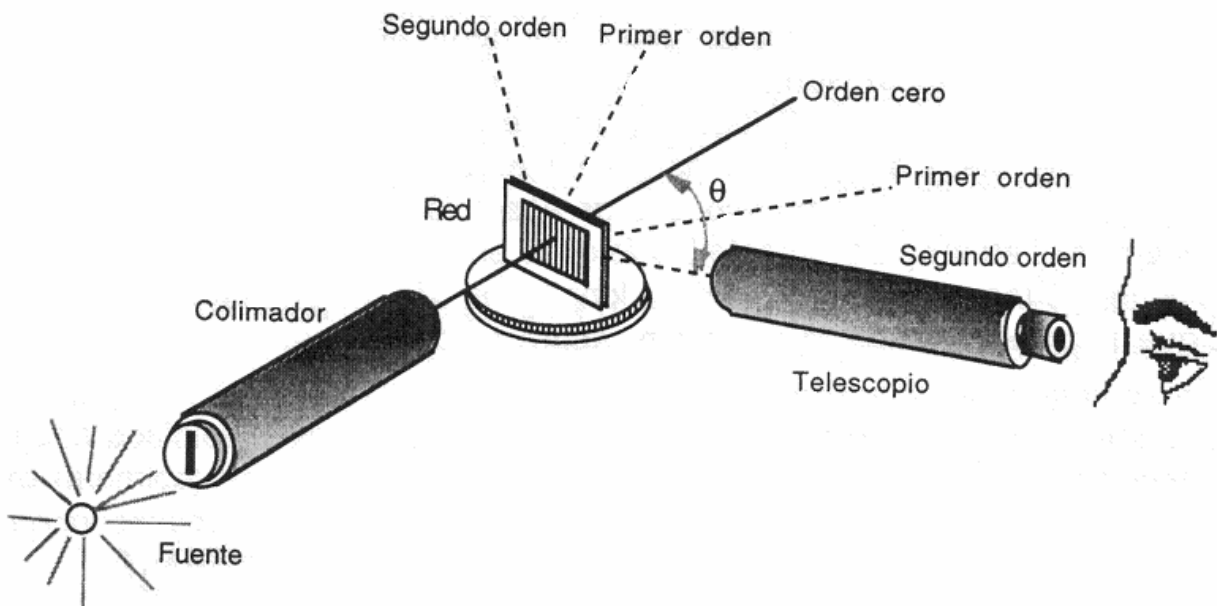


Figura 2. Goniómetro de rendija.

El espectrómetro es un dispositivo utilizado para medir y separar longitudes de onda haciendo uso de un medio difractante como un prisma o una red de difracción (que puede ser de transmisión o de reflexión). Consta de tres partes (figura 2): colimador, plataforma graduada y telescopio.

El colimador generalmente se encuentra fijo con la base del goniómetro, y está formado por una rendija de ancho variable y una lente convergente, que se utiliza para formar un haz paralelo sobre el elemento difractante. El telescopio es móvil y posee dos tornillos, uno que lo fija a la base y otro que se utiliza para los movimientos finos del telescopio al medir los ángulos de desviación de los espectros en la plataforma; consta de una lente convergente utilizada para enfocar el haz en el ojo, y de una escala llamada retículo, que se utiliza para fijar la posición de las líneas espectrales. La plataforma graduada sirve de base al elemento difractante y posee una escala en grados para medir los ángulos de desviación observados. Generalmente lleva anexado un vernier, el cual permite mediciones de menos de 0,5 grados.

#### IV. Red de difracción

Este dispositivo es ampliamente utilizado en sistemas de espectroscopia debido a que permite en general (dependiendo de sus características) una mejor separación de las líneas espectrales que otros dispositivos como el prisma. Consiste en un gran número de rendijas muy concentradas, paralelas e igualmente espaciadas (una red típica puede tener de 10.000 a 15.000 rendijas por centímetro). El número de líneas por mm se lo llama "Constante de la red". El patrón de máximos y mínimos que producen estos dispositivos se puede obtener como un límite del patrón de difracción e interferencia de un sistema de dos rendijas. Partiendo de un haz de rayos paralelos que inciden perpendicularmente sobre una red (figura 3), obtenemos los rayos que pasan sin desviarse ( $\theta = 0$ ), los cuales interfieren constructivamente produciendo un punto brillante en el centro de la pantalla

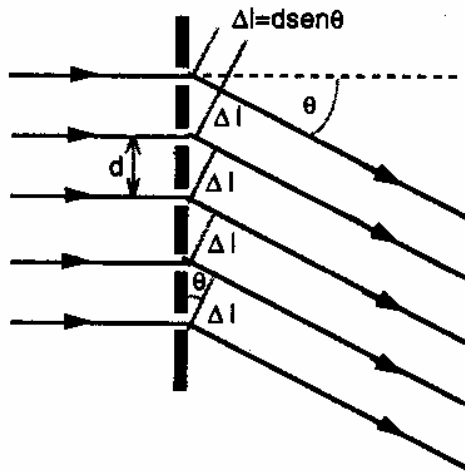


Figura 3. Interferencia en una red con rayos paralelos.

Para cualquier otro ángulo, se producirá interferencia constructiva cuando el camino adicional recorrido por cada haz  $\Delta l$  sea igual a un número entero de veces la longitud de onda incidente  $\Delta l = m\lambda$  que en términos de la separación entre rendijas se puede expresar como:

$$\text{sen}\theta = \frac{m\lambda}{d} \quad \text{con } m = 0, \pm 1, \pm 2, \quad (2)$$

m se conoce cómo el número de orden, y se puede probar que al ir aumentando en número  $N$  de rendijas y disminuir su separación los máximos se hacen más intensos y estrechos.

Las propiedades de una red, que determinan su capacidad de resolución y separación, se cuantifican a partir de la dispersión y el poder de resolución. La dispersión  $D$  está relacionada con la separación angular  $\Delta\theta$  que se puede obtener en un pequeño intervalo de longitudes de onda  $\Delta\lambda$ . Viene dada por la expresión:

$$D = \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{d\cos\theta} \quad (3)$$

El poder de resolución  $R$  está relacionado con el ancho de los picos de intensidad y es un parámetro importante para poder diferenciar líneas espectrales muy cercanas. Se define como:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = Nm \quad (4)$$

## ACTIVIDADES PRELIMINARES

- A)** La condición de interferencia constructiva es la misma para un sistema de  $N$  rendijas o un sistema de dos rendijas. ¿Por qué no se utiliza esta última como elemento difractante en un espectrómetro? Explique las diferencias.
- B)** Demuestre la ecuación (4)

## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### A. Puesta a punto del goniómetro

**Instrucciones generales.** El goniómetro debería estar básicamente alineado. Ud debe revisar la alineación y corregirla si no es adecuada. Pida ayuda al profesor en caso de duda. Familiarícese con el goniómetro. Identifique sus partes. Hay tornillos de fijación para la mesa del goniómetro y del telescopio de observación y tornillos para movimiento fino. Cuando los tornillos de fijación se apretan, se pueden usar los tornillos de movimiento fino. Para trabajar con el goniómetro y hacer la medida de las líneas de los espectros es necesario trabajar en oscuridad ya que las líneas pueden ser débiles. Después de algunos minutos en la oscuridad sus ojos adquieren la visión nocturna y son capaces de ver las líneas mas adecuadamente. Para hacer la medición de los ángulos, no encienda la luz. Utilice, en lugar, una linterna de LEDs. Apague la linterna cuando no esté en uso.

- **A1. Enfoque del espectrómetro.** Antes de colocar la red de transmisión en el goniómetro, se debe garantizar que los haces de luz procedentes del *colimador* incidan sobre la red con el mismo ángulo (condición de Fraunhofer); para lograr esto, se procede a enfocar con el *telescopio* un objeto lejano, posteriormente se enfrentan el *telescopio* y el *colimador*, ajustando la lente de éste último hasta enfocar la rendija. A continuación, alinee el retículo con la rendija y enfóquelo.

- **A2. Alineación.** Coloque la red de transmisión sobre su base, cuidándose de **no tocarla con los dedos ni tratar de limpiarla**. La red o sistema de rendijas es un dispositivo muy delicado que puede perder sus propiedades debido a rayas o depósitos de sucio en su superficie. Ilumine la rendija con un tubo de descarga. Luego de colocar la red sobre la plataforma rotatoria, debe nivelar esta última, para lo cual se debe observar las líneas de emisión a ambos lados del haz transmitido, centradas en el telescopio; si esta condición no se cumple, proceda a ajustar el nivel de la plataforma utilizando los tres tornillos que le sirven de base. A continuación, debe enfrentarse la red de manera que los haces incidan perpendicularmente en ella; para verificar esto, se debe observar una línea del espectro de emisión a ambos lados de la imagen transmitida (difracción de orden cero) con una diferencia en el ángulo de desviación entre ambos casos de menos de 0,5 grados. Luego de ajustar la orientación de la red, fije con su respectivo tornillo la plataforma. Recuerde que para medir la rendija esta debe ser lo mas estrecha posible, pero que permita la medición.
- **A3. Precisión.** Identifique los vernieres y elija uno de ellos para medir. Note que la precisión de la escala principal es de medio grado. El nonio tiene 30 divisiones correspondientes a 30 minutos en los que se divide medio grado. La precisión complementaria que brinda el nonio es de  $0,5^\circ/30$ , es decir, de un sesentavo de grado o un minuto.

## B. Calibración del goniómetro espectrómetro

- **B1.** Coloque, en la fuente de alto voltaje, un tubo de descarga conocido que será utilizado para calibración (Helio, Hidrógeno o mercurio. Pregunte a su profesor). Recuerde mantener apagada la fuente de alto voltaje cada vez que cambie de tubo, el cual puede estar caliente luego de estar cierto tiempo prendido.
- **B2.** Proceda a medir, a ambos lados del orden cero, los ángulos de desviación (respecto a  $m = 0$ ) para cada línea de emisión correspondiente al primero orden. Construya una tabla (ver ejemplo mas abajo) con las longitudes de onda  $\lambda$  correspondientes para cada línea y los valores medidos de la indicación angular en el primer orden del lado izquierdo y primer orden del lado derecho. Si hace mas de una medida de cada línea, Incluya en la tabla el promedio del ángulo de desviación de cada línea:  $\delta_{izq}$  y  $\delta_{der}$ . El valor angular  $\theta$  para cada línea medida del espectro será:

$$\theta = \frac{|\delta_{izq} - \delta_{der}|}{2} \quad (5)$$

- **B3.** Proceda a elaborar la curva de calibración: Grafique, con su respectivo error, la longitud de onda (nm o Å) vs el seno del ángulo de desviación. Ver Eq. (2). Haga un ajuste de curva y de la pendiente, determine, el valor de "d" (en mm) y la constante de la red (1/d líneas por mm). Compare con el valor indicado. Haciendo un estimado del número de rendijas iluminadas, obtenga el poder de resolución (aproximado) de la red.

## C. Identificación de elementos

- **C1.** Sustituya el tubo utilizado para la calibración por el correspondiente al elemento desconocido.
- **C2.** Mida los ángulos de desviación  $\delta$  a ambos lados de  $m = 0$  para cada línea de emisión del elemento a identificar, restringiéndose solo al primer orden.
- **C3.** Construya una tabla de valores con el ángulo de desviación promedio (con su error) y, con la gráfica de calibración del espectrómetro, determine las longitudes de onda correspondientes (nm ó Å) a cada línea de emisión del espectro desconocido. Con estos datos, proceda a identificar el elemento ayudándose con las tablas de espectros de emisión de diferentes elementos que se encuentran en el laboratorio. O mediante las tablas asequibles en la WEB. (Ver referencias). Elabore una tabla semejante a la indicada a continuación que contenga el color de la línea, la longitud de onda determinada, el error estimado y para el elemento identificado (o sospechado) la longitud de onda tabulada. (Pudiera haber más de un elemento sospechado)
- **C4.** Sustituya el tubo de descarga por hidrógeno y mida el ángulo de desviación para las cabezas de serie del espectro de emisión ( $H_\alpha$ , roja,  $H_\beta$  verde-azul,  $H_\gamma$  violeta). A partir de las longitudes de onda determinadas experimentalmente, calcule, de la ecuación (1), la constante de Rydberg  $R_H$

Color de la línea	Longitud de onda $\lambda$ medida (nm ó Å)	Error de la medida (nm ó Å)	Elemento sospechado Valor tabulado de $\lambda$ (nm ó Å)	Elemento sospechado (Intensidad)

## PREGUNTAS

1. ¿Cuáles son las ventajas y diferencias entre una red de difracción y un prisma?
2. ¿Cómo puede determinarse la temperatura de una estrella o de un sólido incandescente a partir de su espectro?

## REFERENCIAS

1.- D. Halliday, R. Resnick y K. Krane, *Physics*, Vol. 2 (extended), Caps. 46, 47. Editorial John Wiley & Sons (1992).

2.- En la siguiente página encontrará Ud imágenes de los espectros de emisión de varios gases y también la información de las longitudes de onda  $\lambda$  y de las intensidades de las líneas. <http://astro.u-strasbg.fr/~koppen/discharge/>

---

## **LEY DE BRAGG**

### **OBJETIVOS**

- Estudiar la ley de difracción de Bragg.
- Estudiar el patrón de difracción resultante de la interferencia de reflexiones de dos planos y determinar la longitud de onda de la microondas.

### **MATERIALES**

1. Generador y receptor de microondas.
2. Plataforma giratoria para la orientación de objetos.
3. Sistema de placas paralelas de aluminio y vidrio.
4. Cristal cúbico de esferas de metal.
5. Regla y anillos de goma.

### **DIFRACCION DE LA RADIACION ELECTROMAGNETICA**

La radiación electromagnética consiste en un campo eléctrico y otro magnético, normales entre sí, que oscilan a una frecuencia  $n$  y se propagan a una velocidad  $c$  en el vacío con una dirección normal a ambos campos.

Esta práctica se fundamenta en dos fenómenos físicos de la radiación electromagnética: la reflexión de un haz en la interfaz de dos medios y la interferencia de haces de radiación. A continuación analizaremos estos fenómenos por separado, para luego combinarlos para obtener el fenómeno de la difracción.

Cuando una onda electromagnética que se propaga en un medio, incide sobre la interfaz con otro medio, parte de la radiación se refleja continuando su propagación en el medio original, y la porción restante se refracta, pasando a propagarse en el segundo medio. Estos fenómenos están determinados por *la ley de reflexión* y *la ley de refracción(o ley de Snell)*.

En la Figura 1 se ilustran los fenómenos descritos en el párrafo anterior y se introduce la nomenclatura que usaremos en esta práctica. El vector  $\hat{O}$  es normal a la interfaz;  $\alpha_i$  es el ángulo entre la dirección del haz y la normal;  $\alpha_r$  representa el ángulo entre el haz reflejado y la dirección normal;  $\beta_t$  es el ángulo entre el haz transmitido y la dirección normal; finalmente,  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción de los medios que vienen dados por la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y en el medio. Con estos parámetros se cumple

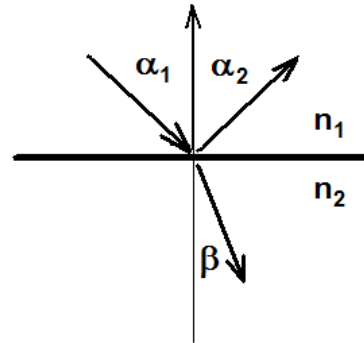


Fig 1 Fenómeno de reflexión y refracción de la radiación electromagnética

$$\alpha_r = \alpha_i \quad (1)$$

$$n_1 \text{sen} \alpha_1 = n_2 \text{sen} \alpha_2 \quad (2)$$

El otro fenómeno que nos interesa es la interferencia de los haces de ondas electromagnéticas. Cuando en un punto dado del espacio coinciden dos haces de ondas electromagnéticas, se da una adición vectorial de los campos eléctricos que la determinan. Dependiendo de la fase relativa de una onda respecto a la otra, es posible obtener desde una adición de los campos para producir un refuerzo de la intensidad de la radiación hasta la cancelación del campo para producir una intensidad cero de la radiación. En el primer caso se habla de una interferencia constructiva, mientras que al último se le llama una interferencia destructiva.

Apliquemos estos conceptos en un caso sencillo. Supongamos que un frente de onda plano de radiación electromagnética incide sobre una superficie que refleja parte de la onda y transmite el resto; y que la onda transmitida es posteriormente reflejada en una segunda superficie a una distancia  $d$  de la primera, tal como se ilustra en la Figura 2.

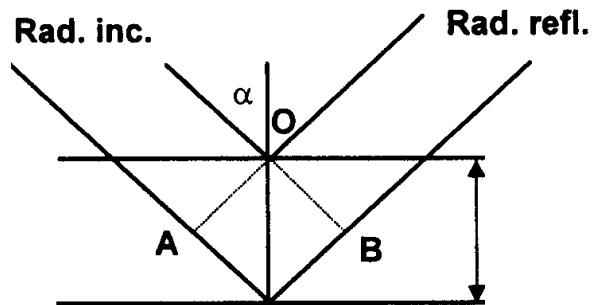


Fig. 2. Reflexión de un frente plano de radiación electromagnética por dos superficies

Observe que en esta representación estamos suponiendo que el espacio anterior y posterior a la primera superficie tiene el mismo índice de refracción, y que el espesor del medio que forma esa superficie es despreciable. El frente de onda plano que se obtiene con las reflexiones será el resultado de la interferencia entre las dos ondas electromagnéticas que han recorrido diferentes caminos. La distancia  $AO'B$  es la diferencia en los caminos recorridos por los dos haces

esquematisados en la Figura. Si esta distancia es exactamente una o varias longitudes de ondas de la radiación, entonces la reconstrucción del frente de onda se hará con una interferencia constructiva, en cualquier otro caso la radiación electromagnética de ambos haces no tiene la misma fase y se produce una cancelación de la radiación por una interferencia parcial o total.

Lo dicho anteriormente en palabras podemos expresarlo cuantitativamente de la siguiente manera: se obtiene una interferencia constructiva de la radiación electromagnética reflejada en el sistema de la Figura 2 si se cumple que

$$\text{distancia } AO'B = n \lambda \quad (3)$$

donde  $n$  es un entero positivo. Pero usando consideraciones geométricas podemos demostrar que

$$\text{distancia } AO'B = 2 d \cos(\alpha) \quad (4)$$

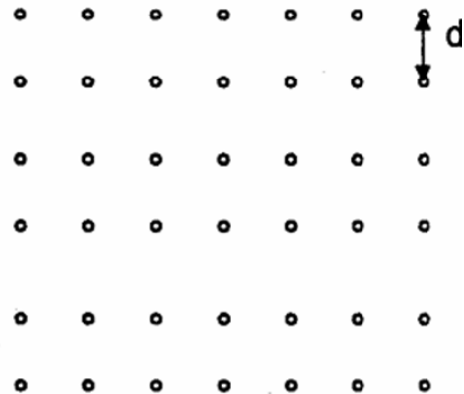
y combinando ambas expresiones podemos concluir que la condición de interferencia constructiva se obtiene para aquellos ángulos de incidencia  $\alpha$  que cumplan con la condición de que

$$2 d \cos(\alpha) = n \lambda \quad (5)$$

A este fenómeno físico también se le refiere como que el sistema muestra un pico de difracción para el ángulo  $\alpha$ , en analogía con el fenómeno de difracción que resulta de las interferencias observadas a diferentes ángulos con la radiación que ilumina una rendija, o con las reflexiones de la radiación que ilumina un objeto.

Con el sistema de la Figura 2, si se conoce  $d$  y se encuentran los ángulos  $\alpha$  para los cuales se pueden observar picos de difracción, entonces es posible determinar la longitud de onda de la radiación electromagnética.

Otro sistema donde se puede observar este fenómeno físico es en el de los sólidos cristalinos y fijos que se repiten muchas veces para formar el cristal. En esta distribución se pueden identificar celdas tridimensionales de variadas formas (cubos, romboedros, paralelepípedos, etc.) que determinan la estructura cristalina. En este curso nos limitaremos al caso cúbico para ilustrar el fenómeno.



**Fig.3. Corte horizontal de un cristal cúbico**

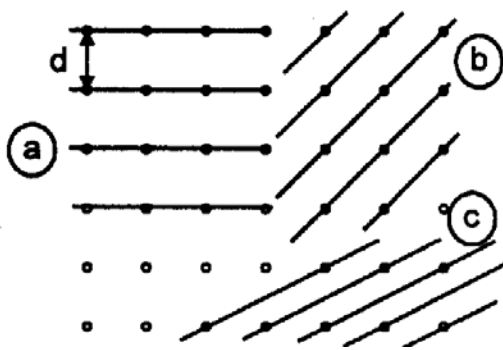


Fig.4. Familia de planos en un cristal Cúbico.

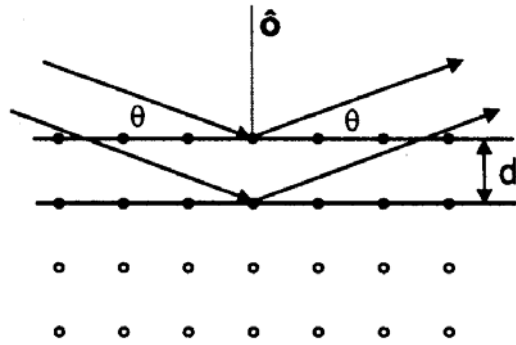


Fig.5. Incidencia de radiación Electromagnética sobre un cristal

En este caso los átomos se encuentran distribuidos formando cubos. Un corte horizontal del cristal sería como se muestra en la Figura 3, donde la distancia  $d$  es la mínima separación entre dos átomos.

En la estructura de la Figura 3 es posible identificar familias de planos paralelos con una separación entre ellos que dependan de la distancia  $d$  y la geometría del cristal. En la Figura 4 se ilustran varias de estas familias de planos. Los físicos de estado sólido describen los diferentes planos mediante un conjunto de tres números llamados los índices de Miller que se definen en función del inverso de las distancias en donde los planos cortan un determinado sistema de referencia en el cristal, que luego se normalizan para expresarlos como los menores enteros posibles que guardan la misma proporción. La familia de planos "a" se denota (100) porque sólo corta un eje. La familia de planos "b" se denota (110) porque corta dos ejes a una misma distancia del origen. Y la familia "c" se denota (210) porque corta dos ejes, con distancias diferentes, siendo una el doble de la otra. La separación entre planos de la familia "a" (100) es directamente  $d$ . Y la separación entre planos de la familia "b" (110) es  $d \cos(45^\circ) = d/\sqrt{2}$ .

Si sobre un cristal se hace incidir radiación electromagnética, a un ángulo  $\theta$  respecto al plano de la superficie, como se indica en la Figura 5, se tendrá un pico de difracción si se cumple

$$2 d \text{sen}(\theta) = n \lambda \quad (6)$$

Observe que en esta relación se usa el seno en lugar del coseno porque se está midiendo el ángulo respecto a la superficie y no respecto a la normal.

Empezando por  $\theta = 0^\circ$ , podemos decir que el primer pico de difracción se tiene en  $\theta = \theta_1$  cuando  $2d \text{sen}(\theta_1) = \lambda_1$ , y que el segundo pico de difracción se tiene en  $\theta = \theta_2$  cuando  $2d \text{sen}(\theta_2) = 2\lambda$ . De acuerdo con el valor de  $n$  para el cual se tiene la difracción, a los picos se les llama de primer orden, de segundo orden, etc. Adicionalmente, dependiendo de los valores de  $d$  y  $\lambda$ , existe un máximo en el número de órdenes que pueden observarse en un experimento de difracción por cuanto a partir de cierta  $n$ , el producto  $n\lambda$  supera a  $2d$ , el máximo valor que puede tener el lado izquierdo de la ecuación con un ángulo de  $90^\circ$ , y no existe solución real.

La ecuación anterior se le llama ley de Bragg en honor de los físicos William H. Bragg y William L. Bragg (padre e hijo) que la derivaron por vez primera después del descubrimiento, en 1912, de la difracción de rayos X en cristales, por lo que obtuvieron el premio Nóbel de Física en 1915.

Un último comentario respecto a la difracción de Bragg es que la longitud de onda de la radiación debe ser menor que  $2d$ . En caso contrario no existe ángulo que satisfaga la relación de la ley de Bragg. Por otra parte, la longitud de onda no debe ser excesivamente menor, por cuanto la intensidad de los picos de difracción disminuye a medida que el orden aumenta.

### **ACTIVIDADES PRELIMINARES**

- a) Cuál será la distancia entre planos para la familia de planos designada con la letra "c" (2,1,0) en la Figura 4?
- b) Derive la ley de Bragg usando la notación de la Figura 5.
- c) Si la distancia entre planos de un sistema es de 1 cm, ¿cuál es el máximo número de picos de difracción que pueden observarse si la longitud de la radiación electromagnética es de 0,2 cm?

### **PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

#### **A. Determinación de la longitud de onda de la microonda.**

Usando un sistema como el mostrado en la Figura 6 se propone determinar la longitud de onda de la microonda usada en el laboratorio. La superficie semitransparente es producida por un vidrio de espesor despreciable. La segunda superficie reflectora es obtenida con una lámina metálica.

**A 1.-**Haga el montaje que se indica en la Figura 6. La separación entre la lente y el emisor o receptor debe ser de 50 cm que es la distancia focal de la lente. Use una separación de ~8 cm entre el vidrio y la lámina metálica y asegúrese que estén paralelos. Tenga cuidado al alinear el montaje de las dos placas para que los ángulos que va a medir sobre la plataforma giratoria correspondan a los que se indican en la Figura.

**NOTA:** Cuando gire el brazo del receptor, sostenga tanto la lente como el receptor para evitar que se rompa el acoplamiento entre el eje y la plataforma giratoria. Use los anillos de goma para fijar las posiciones de la lente y el receptor sobre la barra de aluminio que sirve de eje.

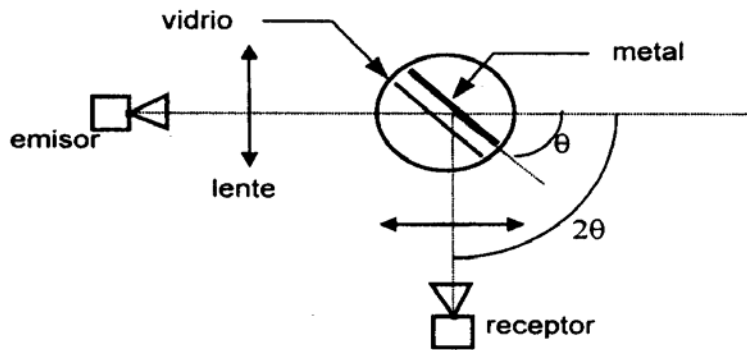


Fig. 6 Montaje experiemntal para placas paralelas

- A2.-Colocando** un ángulo  $\theta = 0^\circ$ , encienda el control del emisor de microondas. Obtenga la máxima señal en el medidor del receptor, aunque pase de 100%. Si excede 100 % desenfóque ligeramente el transmisor (alejar o acercar) hasta que la señal sea 100%
- A3.-Variando** el ángulo  $\theta$ , grado por grado, desde  $0^\circ$  hasta el máximo posible (Que es bastante más de  $45^\circ$ ), mida la señal obtenida en el receptor. Trate de mantener lo mejor posible la relación de 1:2 entre los ángulos del sistema de placas y el receptor. Cuando tenga picos de recepción disminuya el paso con que avanza (Cada grado) en el barrido del ángulo  $\theta$ .
- A4.-Haga** un gráfico de la intensidad de microondas medida versus el ángulo  $\theta$ . Determine los ángulos para los picos de difracción. Una los puntos experimentales con una línea suavizada.
- A5.-Interprete** sus resultados y derive el mejor valor posible de la longitud de onda de la microonda.

## **B. Medida de la distancia entre planos de un cristal.**

En este ensayo se busca reproducir la difracción de radiación electromagnética por parte de un cristal. Dado que las distancias interatómicas en un cristal son del orden de 0,1 nm, la radiación electromagnética que se debe usar es en rango de los rayos X, para lo cual se requeriría un costoso y complicado equipo. Para simular esto se ha construido un "cristal" de anime donde los átomos son esferas metálicas, con una distribución que corresponde a una red cúbica. El espaciamiento entre ellas es tal que se puede usar la microonda como la radiación electromagnética. Este proceso reproduce exactamente el fenómeno físico de la difracción de rayos X por un cristal,

solamente que se cambian en varios órdenes las magnitudes físicas involucradas (longitud de onda y distancia interatómica).

**B1.-** En el montaje de la parte anterior reemplace el soporte de las láminas de vidrio y metal por el cubo de anime. Oriente el cubo de forma tal que para el ángulo  $\theta = 0^\circ$  quede el plano de una de las caras del cubo paralelo al plano de la lente. Con esta orientación la medida de los ángulos es con respecto a un plano (100).

**B2.-** Con el ángulo  $\theta = 0^\circ$  encienda el generador de microondas y ajuste el potenciómetro para obtener el máximo de la señal, en forma análoga a como lo hizo en la parte anterior.

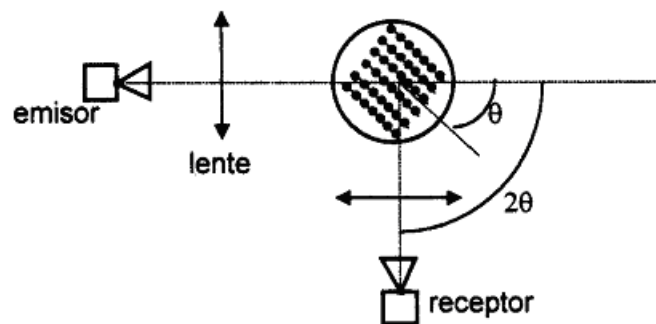


Fig. 7 Montaje experimental para el cristal simulado.

**B3.-** Repita el procedimiento descrito en los pasos A3 y A4 de la parte anterior.

**B4.-** Interprete el patrón de difracción o difractograma obtenido. Derive la distancia entre planos para la familia de planos (100).

**B5.-** Vuelva al ángulo  $\theta = 0^\circ$  y oriente el cubo de anime de forma tal que sus caras verticales formen un ángulo de  $45^\circ$  con respecto al plano de la lente y a la dirección definida por el eje transmisor-receptor. Con esta orientación la medida de los ángulos es con respecto a un plano (110).

**B6.-** Repita los pasos B3 y B4 de este procedimiento.

## PREGUNTAS

1. ¿Por qué observa dos picos en el difractograma de los planos (100) y sólo uno en el de los planos (110)?
2. ¿Cree Ud. que podría utilizarse la difracción de Bragg para reconocer átomos en un cristal? Explique su respuesta.

## **REFERENCIAS**

1. D. Halliday, R. Resnick y K. Krane, *Física*, Vol. 2, Cap. 47, Ed. Continental (1995).
2. [http://en.wikipedia.org/wiki/Bragg's\\_law](http://en.wikipedia.org/wiki/Bragg's_law)

## *EL EFECTO FOTOELECTRICO*

### **OBJETIVOS**

- Determinar la curva característica corriente-tensión de un tubo fotoeléctrico.
- Medir la corriente fotoeléctrica en función de la intensidad luminosa y comprobar la dependencia funcional entre estas dos variables.
- Medir el potencial de interrupción en función de la frecuencia de la luz incidente y comprobar la dependencia funcional entre estas dos variables.
- Determinar la función de trabajo del material del que están hechos los electrodos del tubo.
- Determinar la constante de Planck.

### **MATERIALES**

1. Montaje con tubo fotoeléctrico.
2. Dos filtros de luz (amarillo y verde).
3. Filtro de transmisión variable.
4. Multímetro.
5. Multímetro de alta precisión.
6. Una lámpara de mercurio.
7. Lente adosada a una rejilla de difracción y a un colimador.
8. Caja de resistencia variable.
9. Fuente de voltaje
10. Divisor de voltaje

## TEORIA

### I. Efecto fotoeléctrico

Heinrich Hertz, en 1887, descubrió que, al iluminar con luz ultravioleta los electrodos entre los que se producía una chispa, se facilita la producción de ésta. Investigaciones posteriores permitieron demostrar que este efecto se debe a que los electrones toman de la luz la energía necesaria para liberarse de la superficie de los electrodos. El fenómeno mediante el cual una superficie emite electrones al absorber luz se denomina *efecto fotoeléctrico* y a los electrones emitidos de esta manera se les llama *fotodectrones*. Un experimento típico para estudiar este efecto se muestra en la Figura

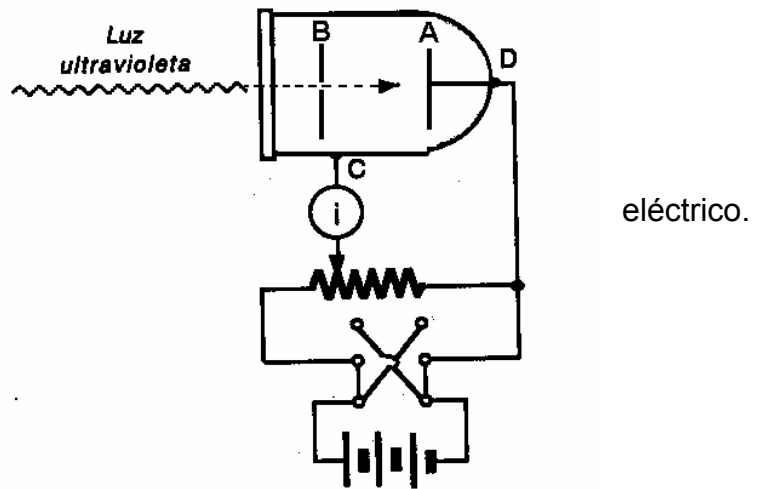


Figura 1. Fotocelda con su circuito

eléctrico.

Acá, la luz incide sobre una ampolla que contiene dos electrodos (A y B). La luz incide en el electrodo A (o cátodo), fabricado del material en estudio. El electrodo C (o ánodo) atrae los fotodectrones emitidos por A si se le coloca a un potencial positivo  $V$  con respecto a A. Con el fin de garantizar que los electrones alcancen el ánodo es necesario minimizar las pérdidas de energía por colisiones con otras partículas. Para ello se evacúa la ampolla a utilizar hasta alcanzar una presión máxima del orden de  $10^{-4}$  mm de Hg. Los electrones recorren el circuito ABCDA y el amperímetro registra una corriente  $i$ . Utilizando una luz de frecuencia conocida  $\nu$  se realizan mediciones de  $i$  en función de  $V$ . En la Figura 2 se muestran resultados característicos para una intensidad dada de luz incidente (curva 1) Y para el 'doble de esta intensidad (curva 2).

De la Figura 2 podemos resaltar los siguientes aspectos:

- Aun cuando  $V$  sea cero, algunos fotodectrones emitidos por A alcanzan a B y producen una corriente  $i$ .

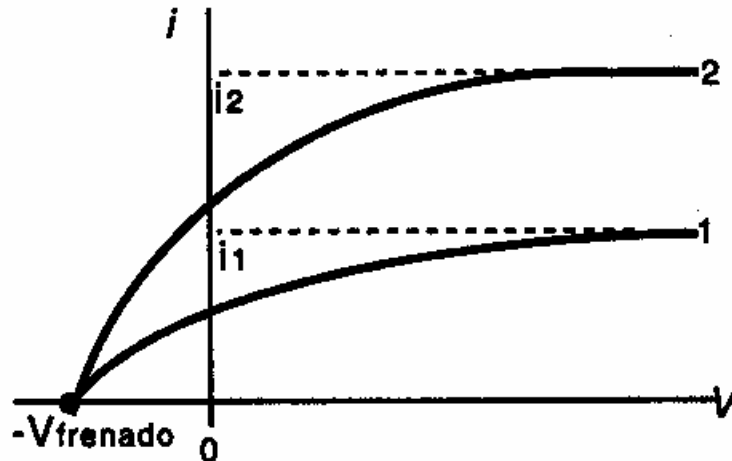


Figura 2. Corriente fotoeléctrica versus diferencia de potencial entre electrodos para dos diferentes intensidades de luz

- A medida que el potencial del ánodo se torne más positivo con respecto al del cátodo, se incrementa la atracción de electrones hasta alcanzar un valor de saturación de la corriente  $i$ . Este valor corresponde a la corriente originada por todos los electrones emitidos por A. Si la intensidad de la luz se duplica, la corriente de saturación también se duplica.
- Si el potencial  $V$  del electrodo  $B$  se hace negativo respecto al del electrodo  $A$ , los electrones incidentes sobre  $B$  son repelidos y la corriente empieza a disminuir hasta hacerse cero cuando el potencial alcanza un valor negativo característico llamado *potencial de frenado* o *potencial de interrupción*,  $V_i$ . Para valores más negativos que  $V_i$  tampoco se registrará corriente. La existencia de este potencial de interrupción se interpreta considerando que el electrodo iluminado emite fotoelectrones con energías cinéticas ( $K$ ) dentro de cierto rango, y cuyo valor máximo ( $K_{max}$ ) viene dado por:

$$K_{max} = eV_i \quad (1)$$

En la expresión (1)  $e$  es el valor absoluto de la carga del electrón.

Las propiedades enumeradas hasta ahora del efecto fotoeléctrico están en profundo conflicto con las predicciones de la teoría ondulatoria de la luz.

De acuerdo con esta teoría, al aumentar la intensidad de la luz de  $i$  a  $2i$ , el campo eléctrico de la onda debe aumentar de  $E$  a  $2^{1/2} E$ . Este campo eléctrico es el que actúa sobre los electrones extraídos del electrodo  $A$ , ejerciendo sobre ellos una fuerza:

$$F = e E \quad (2)$$

por lo que la duplicación de la intensidad debe originar un incremento de esta fuerza de un factor  $2^{1/2}$  lo que aceleraría más los electrones. La experiencia contradice esta predicción: tal como se puede observar en la Figura 2, el potencial de interrupción  $V_i$  es común a las curvas 1 y 2.

Además, de acuerdo a la teoría ondulatoria, podríamos ajustar la fuente de manera que la intensidad de la luz incidente sea tan baja que el electrón requiera de un tiempo finito y medible para lograr acumular la energía requerida para escapar del material. Sin embargo, se han realizado experimentos con tiempos de resolución mejores que  $10^9$  segundos, que demuestran que no existe un tiempo medible entre el instante en el cual la radiación comienza a iluminar la superficie y la emisión del primer electrón.

El papel de la frecuencia de la luz en el efecto fotoeléctrico se estudia iluminando el material con luz de diferentes frecuencias. En este tipo de experimentos se puede observar que el módulo del potencial de interrupción  $V_i$  aumenta al aumentar la frecuencia de la luz incidente, y que cuando el valor de la frecuencia es más bajo que el de una frecuencia de corte determinada,  $\nu_c$  no se liberan electrones del material.

De acuerdo con la teoría ondulatoria, la radiación incidente de cualquier frecuencia  $\nu$  debería de ser capaz de suministrar energía suficiente a los electrones en la superficie del material que absorbe la radiación como para posibilitar su escape de ella; sólo se necesitaría que la radiación fuese lo suficientemente intensa

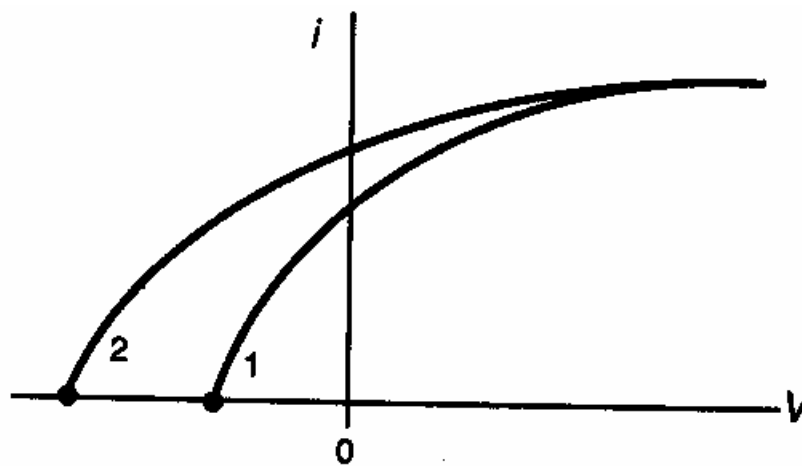


Figura 3. Corriente fotoeléctrica versus diferencia de potencial entre electrodos para dos diferentes frecuencias de la luz. Los potenciales 1 y 2 se los llama “Potencial de interrupción” Son valores de potencial para los cuales la intensidad  $i$  se hace cero.

La Figura 3 muestra dos curvas  $i$  versus  $V$  para luz de frecuencias  $\nu_1$  (curva 1) y  $\nu_2$  (curva 2), siendo  $\nu_1 \geq \nu_2$  La intensidad de luz se ha mantenido constante para las dos frecuencias.

De este tipo de experimentos se obtienen también gráficas similares a la mostrada en la Figura 4, en la cual se presenta el módulo del potencial de interrupción (o de corte) versus la frecuencia de la luz incidente para superficies emisoras diferentes.

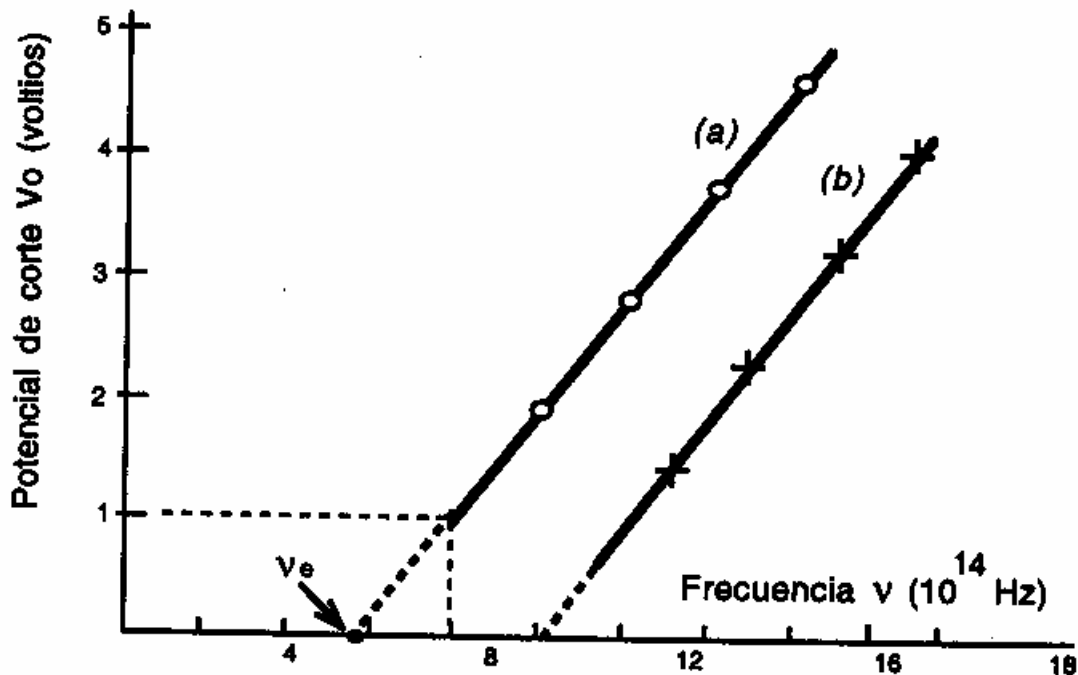


Figura 4. Variación del módulo del potencial de interrupción de los fotoelectrones con la frecuencia para dos superficies emisoras diferentes

En 1905 Einstein propuso una teoría del efecto fotoeléctrico que podía explicar los aspectos que la teoría ondulatoria de la luz no podía. La idea clave de Einstein fue sugerida por la conclusión de Max Planck respecto a la cuantificación de la radiación que emana de un cuerpo negro. Planck creía que la luz se emite en forma discontinua y se propaga a través del espacio como una onda electromagnética. Einstein, recogiendo esta idea, la extendió proponiendo que no sólo la energía electromagnética es emitida en forma de paquetes o cuantos, sino que también se propaga en el espacio en forma discreta. A un cuanto de energía se le dio el nombre de fotón, cuya energía  $K$ , es directamente proporcional a la frecuencia de la radiación electromagnética:

$$K_r = \frac{hc}{\lambda} = h\nu \tag{3}$$

donde  $h$  es la constante de Planck, cuyo valor es  $6,63 \times 10^{-34}$  Joule.segundo-

Einstein afirmó que al interactuar la radiación con la materia, la energía radiante, absorbida está distribuida en paquetes, denominados fotones, cada uno con una energía total  $h\nu$ . En consecuencia, concluyó que en el efecto fotoeléctrico cada fotón entrega toda su energía a un electrón del material absorbente.

La teoría de Einstein elimina de inmediato el problema del retardo temporal de emisión, predicho pero no observado. En el instante en que los cuantos de luz provenientes de una fuente llegan a un material absorbente, cada electrón absorbe un fotón. Para la teoría del fotón, la emisión de un electrón dado es independiente de la intensidad de la luz y

dependiente de la frecuencia de la misma (ya que la energía de un fotón es directamente proporcional a su frecuencia). En 1921, Einstein recibió el premio Nóbel por su audaz concepto del fotón y no por la teoría de la relatividad

El electrón para escapar del material necesita una energía igualo mayor a la energía de enlace  $\varphi$  que lo mantiene ligado a dicho material. Si la energía que le cede el fotón incidente es lo suficientemente alta, el electrón saldrá con una energía cinética  $K$  que viene dada por

$$K = K_f - \varphi = h\nu - \varphi \quad (4)$$

Existe un mínimo valor de  $\varphi$  para los electrones más débilmente ligados; este valor mínimo recibe el nombre de función de trabajo,  $\varphi_o$ . El valor de la función de trabajo depende de la naturaleza del material y de la limpieza de su superficie. Estos electrones más débilmente ligados tendrán una energía cinética máxima al ser liberados que puede escribirse como:

$$K_{\max} = K_f - \varphi_o \quad (5)$$

Substituyendo (1) y (2) en (5) tenemos:

$$eV_i = h\nu - \varphi_o \quad (6)$$

Que también puede expresarse como:

$$V_i = \frac{h\nu}{e} - \frac{\varphi_o}{e} \quad (7)$$

Esta última expresión (7) representa la ecuación de la recta que se presenta en la Figura 4.

Se puede definir también, para un material dado, la frecuencia mínima por debajo de la cual no habrá emisión de electrones, independientemente de la intensidad de la luz; esta frecuencia mínima se llama frecuencia de corte y viene dada por:

$$\nu_c = \frac{\varphi_o}{e} \quad (8)$$

## **II. Tubos de descarga y rejillas de difracción**

En este experimento evitaremos el uso de filtros de luz pues permiten el paso de una banda de frecuencias y no el de una frecuencia perfectamente definida. También evitaremos el uso de luz blanca pues está compuesta de un continuo de frecuencias.

La luz a utilizar provendrá de un tubo de descarga. Se trata de un tubo contentivo de vapor

de mercurio. El voltaje aplicado induce la excitación, de los electrones a niveles de energía muy específicos y por un tiempo finito. El decaimiento de los electrones a su nivel original se hace por la vía de la emisión de fotones. La energía (y por tanto, la frecuencia) de los fotones producto del decaimiento electrónico entre dos niveles dados estará perfectamente definida. Por tanto, la luz del tubo de descarga estará compuesta de un conjunto discreto de frecuencias. Para separar la luz en sus distintos componentes monocromáticos (esto es, de frecuencias o longitud de ondas bien definidas) haremos uso de una rejilla de difracción.

Para una explicación de las propiedades de las redes de difracción y de los tubos de descarga, remitimos el lector a la práctica de *Espectroscopia* que aparece en esta guía.

Note que la luz emitida por el tubo de descarga está *cuantizada*. A su vez el efecto fotoeléctrico es también de naturaleza cuántica.

## **ACTIVIDADES PRELIMINARES**

- a) Si se dispone de una fuente de luz que emite 10 Watts de luz uniformemente en todas las direcciones, ubicada a 1,0 m de una superficie absorbente, calcule el número de fotones que inciden en  $1,0 \text{ cm}^2$  de dicha superficie en 10 segundos. La frecuencia de la luz es  $1 \times 10^{15} \text{ Hz}$ .
- b) La función de trabajo del Na es 2,3 eV. La frecuencia de corte del Cu es  $1,1 \times 10^{15} \text{ Hz}$ . ¿En cuál de los dos metales están los electrones más fuertemente ligados a la superficie?
- c) El ojo humano puede detectar, en las condiciones más favorables, una energía mínima de  $10^{-18} \text{ Joule}$  en la región visible del espectro electromagnético. ¿A cuántos fotones equivale esto? Considere el centro de la región visible, es decir, el amarillo ( $\lambda = 5.890 \text{ \AA} = 589 \text{ nm}$ )

## **PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

### **A. Montaje experimental**

**A1.-** El montaje experimental se presenta en la Figura 5; en el mismo podrá identificar la fuente luminosa, el montaje del tubo fotoeléctrico y la lente adosada a una rejilla de difracción y a un colimador. Encienda la fuente luminosa y permita su calentamiento durante un lapso de unos cinco minutos. La Figura 6 muestra el diagrama de circuito para el experimento.

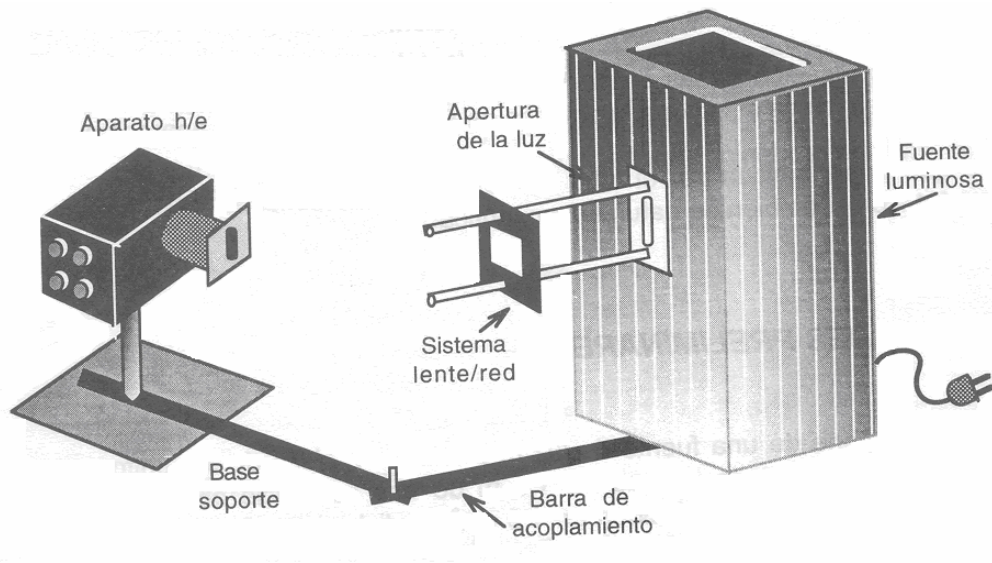


Figura 5. Montaje experimental: Tubo fotoeléctrico y lámpara de mercurio

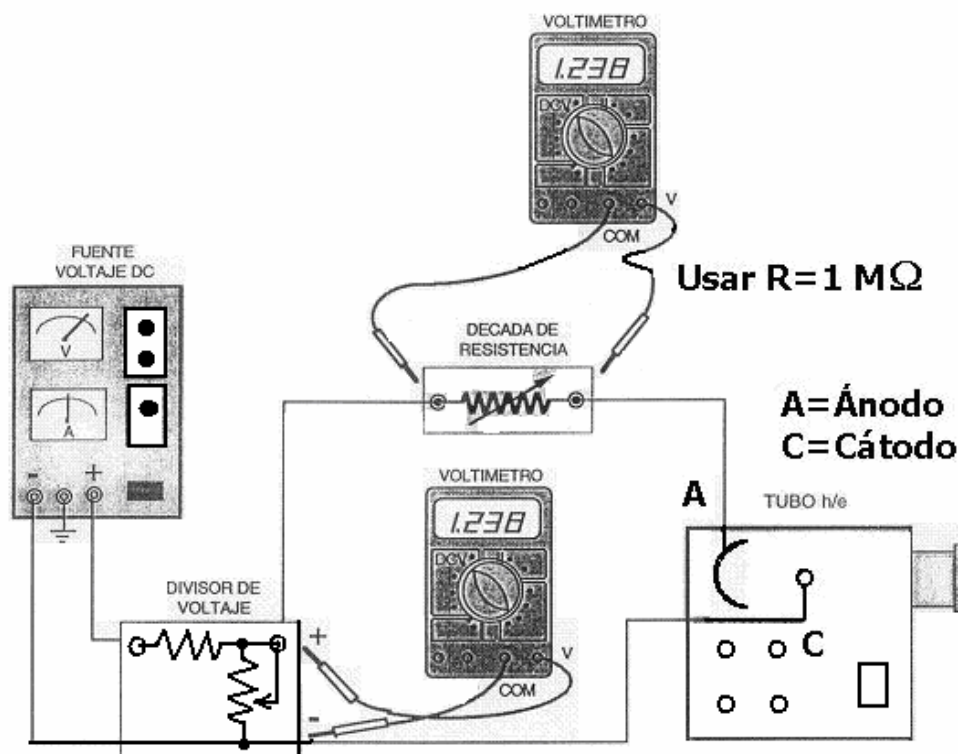


Figura 6. Diagrama del circuito

**A2.-** Conecte en serie el montaje del tubo fotoeléctrico, la fuente de poder y la caja de resistencia variable.(Figura 6) Intercale en el circuito a la salida de la fuente el divisor de voltaje que le permitirá un ajuste fino del voltaje suministrado al circuito. Conecte en paralelo a la caja de resistencias el multímetro digital de alta sensibilidad y seleccione su modalidad de voltímetro. Conecte también en paralelo a la salida del divisor de voltaje (y como voltímetro) el otro multímetro. Fije en la caja de resistencias un valor de  $1\text{ M}\Omega$ .

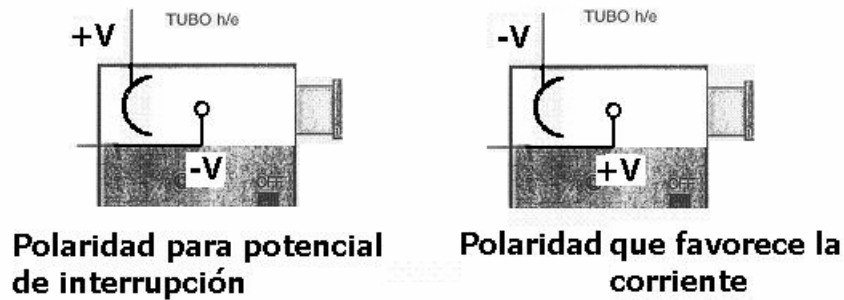


Figura 7. Polaridad en la conexión del tubo fotoeléctrico

Debido a que el fenómeno en consideración supone corrientes sumamente pequeñas, medimos el voltaje en una resistencia de  $1\text{ M}\Omega$ . en vez de medir la corriente directamente con un amperímetro.

**A3.-** Coloque el montaje del tubo fotoeléctrico directamente enfrente de la fuente luminosa. Enfoque la luz sobre la máscara blanca que rodea la apertura del montaje por la vía de mover el conjunto formado por la lente y la rejilla de difracción. La máscara blanca está

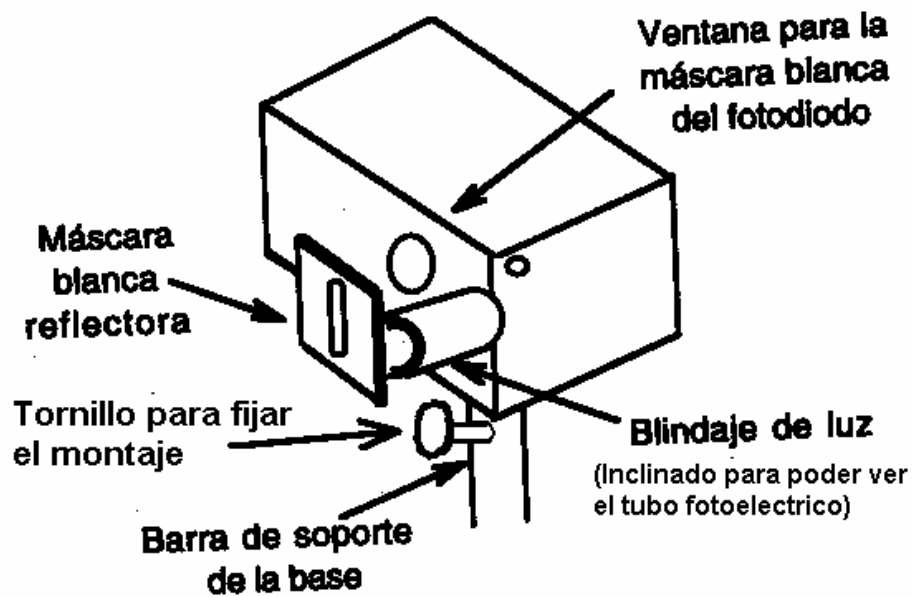


Figura 8. Montaje del tubo fotoeléctrico

hecha de un material fluorescente especial. Por otra parte, la rejilla de difracción está labrada de suerte tal que produce un espectro más brillante a uno de los lados; identifíquelo y haga uso del mismo en lo sucesivo. Identifique las líneas amarilla, verde, azul, violeta1 y violeta 2 (Hay también líneas ultravioleta que no se ven) en el espectro de primer orden del mercurio (las dos últimas líneas lucen azuladas al reflejarse sobre el material fluorescente). Identifique igualmente el segundo orden de difracción (pregunte al profesor si Ud. no ha realizado las prácticas que presentan éstos términos y conceptos).

**A4.-** Ponga a un lado el blindaje de luz del montaje del tubo fotoeléctrico (ver Figura 8) con el objeto de apreciar en el interior del montaje el tubo fotoeléctrico. Alinee el montaje para hacer uso de la luz correspondiente al orden cero (corresponde a luz no difractada). Rote el montaje hasta lograr que la luz de la lámpara ilumine el tubo fotoeléctrico. Fije el conjunto formado por la lente y la rejilla de difracción. Fije igualmente el montaje con el tornillo que lo fija al soporte.

**A5.-** En lo sucesivo, cada vez que vaya a trabajar con una determinada línea espectral, deberá rotar el montaje del tubo fotoeléctrico en torno al "pin" de la barra de acoplamiento hasta que el máximo coloreado del primer orden incida sobre la apertura del tubo. Una vez logrado esto coloque en posición el blindaje. Para las líneas amarilla y verde se usarán además filtros de iguales colores para limitar la entrada de altas frecuencias al tubo. Los filtros se pueden adosar magnéticamente a la apertura del montaje.

**Tabla 1** Espectro simplificado del mercurio (solo las líneas más intensas)

Color	Frecuencia (Hz)	Longitud de onda (nm)
Línea roja difusa (se ve muy poco)		614,95
Línea <b>doble</b> Amarilla (Intensa)	5,186 E+14	577 y 579 (Usar 578)
Verde (intensa)	5,489 E+14	546,074
Azul (Muy débil, casi no se ve)	6,878 E+14	435,84
Violeta 1 (Intensa)	7,3509 E+14	407,7
violeta 2 (se ve azul débil)	8,2026 E+14	365,483
violeta 3 (se ve azul débil)		

### ***B. Curva característica corriente-diferencia de potencial.***

**B1.-** En esta sección trabajaremos únicamente con la línea violeta 1 del primer orden. Aplique al ánodo del tubo un potencial positivo con respecto al cátodo y varíe la diferencia de potencial proporcionada por la fuente entre 0 y 30 Voltios. Mida simultáneamente la diferencia de potencial de la fuente y la de la resistencia de  $1\text{ M}\Omega$ , Escoja adecuadamente la manera como va a cubrir el rango indicado a fin de tener una densidad de puntos adecuada para la elaboración de la curva característica del tubo.

**B2.-** Coloque la fuente en cero e invierta los cables que están conectados al tubo fotoeléctrico con el fin de aplicar al ánodo un potencial negativo respecto al cátodo del tubo. Note que esto introduce un signo negativo a la lectura del potencial de la fuente, pero no altera el de la caída de potencial en la resistencia pues el sentido de la corriente fotoeléctrica es siempre el mismo. A partir de cero, varíe la diferencia de potencial de la fuente en intervalos lo más pequeños posible hasta que la lectura del voltímetro en paralelo a la resistencia de  $1\text{ M}\Omega$ , sea cero.

**B3.-** Elabore en el computador una tabla de datos de dos columnas, una con la diferencia de potencial  $V$  aplicada al tubo y otra con la corriente que circula por el circuito. Debe tener en cuenta que la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo del tubo corresponde a la de la fuente menos la de la resistencia. Haga un gráfico  $i$  versus  $V$ . Una vez hecha la gráfica de puntos trace una línea *suavizada* entre los puntos experimentales.

### **C. Corriente fotoeléctrica en función de la intensidad de la luz incidente.**

**C1.-** Aplique al ánodo del tubo un potencial positivo con respecto al cátodo y fije 30 Voltios en la salida de la fuente. Seleccione la línea Violeta2 del primer orden. Coloque el filtro de transmisión variable. Mida la diferencia de potencial en la resistencia para cada una de las opciones que ofrece el filtro en cuestión.

**C2.-** Repita para la línea azul del primer orden.

**C3.-** Nos interesa analizar la corriente fotoeléctrica en función de la intensidad de la luz incidente (en %). Elabore un gráfico que contenga las dos curvas que ha medido.

**C4.-** Analice sus resultados y concluya.

### **D. Efecto de la frecuencia de la luz incidente en el potencial de interrupción.**

**D1.-** Aplique al ánodo un potencial negativo respecto al cátodo. Proceda a medir cuidadosamente el potencial de interrupción  $V_i$  para cada una de las líneas espectrales del primer orden. Recuerde el uso de filtros cuando sea pertinente. (Amarillo para la línea amarilla y verde para la línea verde)

**D2.-** Elabore en el computador una tabla de dos columnas, una con los valores de las frecuencias y otra con los valores de  $V_i$ . Elabore un gráfico de potencial de interrupción en función de la frecuencia. Grafique los puntos con sus barras de error. Ajuste al gráfico una línea recta y de los parámetros resultantes calcule la constante de Planck y la función trabajo del material del que están hechos los electrodos del tubo. Escoja imprimir solamente la gráfica con cuadrícula y a partir de ella determine el error en la pendiente y en la intersección de la recta; a partir de estos valores determine el error con el cual está determinando  $h$  y  $\phi_0$ .

### **E. Efecto de la intensidad de la luz incidente en el potencial de interrupción.**

**E1.-** Seleccione la línea violeta 2 del primer orden. Determine cuidadosamente el potencial de interrupción por el procedimiento utilizada anteriormente. Coloque el filtro de transmisión variable sobre la lámpara. Proceda a hacer la determinación del potencial de interrupción

para cada una de las opciones que ofrece el filtro en cuestión. Elabore una tabla con los valores medidos

**E2.-** Repita para la línea azul del primer orden.

**E3.-** Elabore un gráfico con los datos obtenidos anteriormente que demuestre la dependencia del potencial de interrupción en función de la intensidad de la luz incidente (en %). Elabore un gráfico que contenga las dos curvas que ha medido.

**E4.-** Analice sus resultados, compárelos con los de la Sección C y concluya.

## **PREGUNTAS**

1. ¿Por qué existe un valor de saturación para la corriente de fotoelectrones en la curva característica de un tubo fotoeléctrico?
2. ¿Podría concluirse que la teoría ondulatoria de la luz debe descartarse ya que no pudo explicar el efecto fotoeléctrico?

## **REFERENCIAS**

1. R. Eisberg y L. Lerner, , Física fundamentos y aplicaciones. Vol. 2 Cap.30 Edición de Graw-Hill Latinoamerica (1984)
2. E. Laredo, M. Puma, *FISICA, base experimental de la física cuántica, Edit. Italgráfica (1976).*
3. P. Tipler, *Física moderna*, Cap. 3. Edit. Reverté (1985).
4. [http://en.wikipedia.org/wiki/Planck\\_constant](http://en.wikipedia.org/wiki/Planck_constant)
5. <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>

## EFFECTO DOPPLER CON ONDAS DE ULTRASONIDO

### Objetivos

1. Estudio de ondas ultrasónicas en el aire
2. Determinación de la velocidad de la onda
3. Estudio del efecto Doppler
4. Caracterización de una onda estacionaria ultrasónica

### Teoría

De acuerdo a su naturaleza física existen varios tipos diferentes de ondas. Las ondas mecánicas consisten en la propagación de energía a través de la materia mediante el movimiento regular y constante de una perturbación que avanza a través de ésta sin que haya un movimiento de masa en la materia misma. En las ondas electromagnéticas o luminosas la perturbación viaja a la velocidad de la luz y no es un movimiento de materia sino un campo electromagnético el cual no necesita de medio para su propagación.

En esta práctica enfocaremos nuestra atención en las ondas ultrasónicas las cuales son un tipo particular de ondas mecánicas con una frecuencia superior a las detectables por el oído humano ( $>20$  kHz). El medio que transmite las ondas mecánicas (ej. aire) debe ser inercial y elástico para originar las fuerzas restauradoras que obran sobre una porción cualquiera del medio que esté fuera de su posición de equilibrio.

Las ondas ultrasónicas, sónicas e infrasónicas son longitudinales, es decir, el movimiento de las partículas de la materia que transporta la onda está en la dirección de la propagación de ésta. En contraste a la propagación de una onda en una cuerda horizontal sometida a tensión donde el movimiento de las partículas y la dirección de propagación de la onda son perpendiculares (ondas mecánicas transversales).

De acuerdo a la duración de la perturbación de una onda podemos "hablar" de:

- 1) **Impulso:** Cuando se produce una sola perturbación en un instante de tiempo dado.
- 2) **Tren de onda:** Cuando la perturbación dura un tiempo largo.

### Ondas Estacionarias longitudinales:

Las expresiones que caracterizan a una sola onda longitudinal (ultrasónica) en el caso de una oscilación armónica simple desplazándose de izquierda a derecha ( $y^+$ ) y de derecha a izquierda ( $y^-$ ) son:

$$y^+ = y_m \cos(kx - \omega t) \quad (1a)$$

$$y^- = y_m \cos(kx + \omega t) \quad (1b)$$

donde  $y$  representa el desplazamiento de las partículas de aire desde su posición de equilibrio a lo largo del eje  $x$ ,  $y_m$  corresponde a la amplitud de la onda (también a lo largo del eje  $x$ ),  $x$  a la dirección de propagación y  $t$  al tiempo. El número de onda  $k$  y la frecuencia angular  $\omega$  están dados por:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2a)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2b)$$

siendo  $\lambda$  la longitud de la onda y  $T$  el período de esta.

De acuerdo al principio de superposición podemos obtener ondas estacionarias si sumamos ondas de igual amplitud, frecuencia y velocidad que viajan en sentido contrario para obtener:

$$y = 2 y_m \cos kx \cos \omega t \quad (3)$$

Esta última ecuación es la llamada ecuación de onda estacionaria la cual presenta varias características importantes:

- 1.- Todas las partículas vibran a la misma frecuencia  $\omega$
- 2.- Una partícula en cualquier punto  $x$  en la dirección de propagación y en todo tiempo  $t$ , ejecuta un movimiento armónico simple, ya que (3) puede describirse como:

$$y = y'_m \cos \omega t \quad (4)$$

- 3.- La amplitud de la onda estacionaria  $y'_m$  está dada por:

$$y'_m = 2 y_m \cos kx \quad (5)$$

lo que lleva a la conclusión de que la amplitud de oscilación de las partículas en diferentes posiciones  $x$ , es diferente, ya que la amplitud  $y'_m$  es una función de  $x$ .

- 4.- La amplitud de la onda de ultrasonido es máxima para:

$$kx = 0, \pi, 2\pi, 3\pi, \dots \quad (6)$$

es decir, para valores de  $x$  dados por:

$$x = 0, \frac{\lambda}{2}, \lambda, \frac{3}{2}\lambda, 2\lambda, \dots \quad (7)$$

ya que:  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ . Estos puntos de máxima amplitud reciben el nombre de "antinodos" o "vientres" y se encuentran

separados por una distancia de media longitud de onda.

- 5.- La amplitud tiene un valor mínimo, de cero, en:

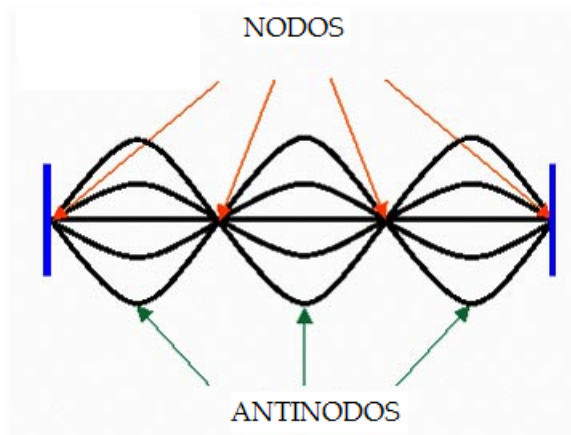
$$kx = \frac{\pi}{2}, \frac{3}{2}\pi, \frac{5}{2}\pi, \dots \quad (8)$$

ya que  $\cos kx$  se anula para estos valores. Los valores de  $x$  donde esto ocurre son:

$$x = \frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4}, \dots \quad (9)$$

y reciben el nombre de "nodos" estando separado por media longitud de onda.

6.- Los nodos y antinodos o vientres se refieren a los desplazamientos de las partículas de la onda estacionaria. En un nodo de desplazamiento las variaciones de presión por encima y debajo de la presión media son máximas. Por consiguiente un nodo de desplazamiento corresponde a un antinodo de presión. En un antinodo de desplazamiento no hay variación de presión, por consiguiente, un antinodo de desplazamiento corresponde a un nodo de presión. Esto se puede entender físicamente dándose cuenta de que dos pequeños elementos de gas en los lados opuestos de un nodo de desplazamiento están vibrando en fases opuestas. Por lo tanto, cuando se aproximan, la presión en ese nodo es máxima y cuando se alejan entre si, la presión en ese nodo es mínima. Dos pequeños elementos de gas que se encuentran en lados opuestos de un antinodo de desplazamiento vibran en fase y por consiguiente no dan lugar a variaciones de presión en el antinodo.



**Figura 1.** Representación de una onda estacionaria.

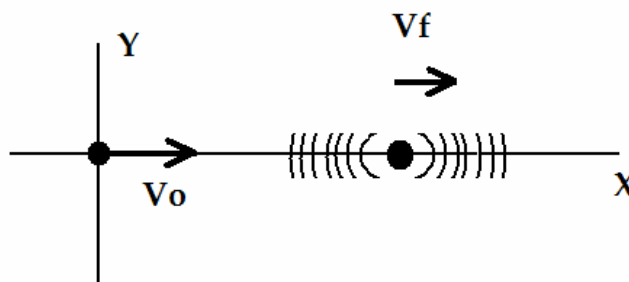
### Efecto Doppler

**Efecto Doppler** se llama a los fenómenos ondulatorios que ocurren cuando una fuente de ondas y un observador se encuentran en movimiento relativo. En el caso de ondas acústicas se observa que la frecuencia de la onda percibida por un observador y la frecuencia de la señal emitida por una fuente no son en general iguales si la fuente, el observador o el medio posee un movimiento relativo.

Supongamos un observador en movimiento con la velocidad  $v_o$  y una fuente de ondas ultrasónicas en movimiento con velocidad  $v_f$ , ambas en el eje  $x$ . Usando la convención de que las velocidades positivas corresponden al sentido positivo del eje  $x$  (hacia la derecha), que el observador se encuentra en el origen y la fuente de ondas en algún punto positivo del eje  $x$ , (ver figura 2) la frecuencia  $f_o$  que percibe el observador está dada en términos de la frecuencia  $f_f$  de la fuente mediante:

$$f_o = f_f \left( \frac{c + v_o}{c + v_f} \right) \quad (10)$$

donde  $c$  es la velocidad del sonido en el aire. Recordemos que la velocidad del sonido se obtiene a partir de la longitud de onda y de la frecuencia con:  $c = \lambda f$



**Figura 2.** Observador en el origen y una fuente de sonido

Si el aire se mueve el efecto es de alterar la velocidad efectiva del sonido. Suponiendo que el aire se mueva con velocidad,  $v_a$  de izquierda a derecha: la velocidad efectiva del sonido,  $c_e$ , entre la fuente y el observador es:

$$c_e = c - v_a$$

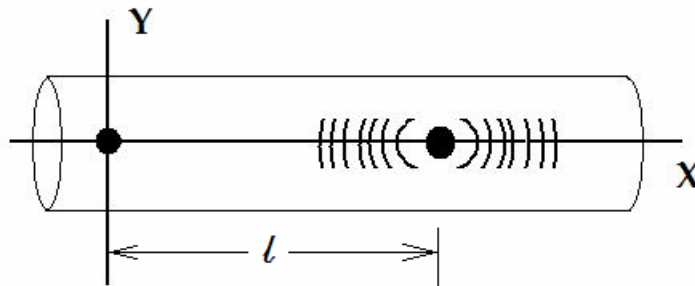
Por lo tanto al substituirse  $c$  en la relación anterior por la expresión de la velocidad efectiva, se obtiene:

$$f_o = f_f \left( \frac{c - v_a + v_o}{c - v_a + v_f} \right) \quad (11)$$

Esta relación predice la frecuencia percibida por el observador en función de la frecuencia de la fuente y de las velocidades de la fuente, el observador, el aire y el sonido.

Observe que si la velocidad del observador  $v_o$  o de la fuente  $v_f$  no son cero, la velocidad del aire hace que la frecuencia percibida sea diferente a la de la fuente. En cambio si  $v_o$  y  $v_f$  son nulos, la velocidad del aire no modifica la frecuencia. En este último caso los cambios en la velocidad del aire tienen el efecto de alterar la fase de la onda recibida por el observador, permaneciendo la frecuencia constante. En la experiencia a realizar se mide este cambio de fase lo cual permite determinar la velocidad del aire.

Considérese el transmisor y el receptor separados una distancia  $l$  sobre el eje  $x$ , y que inicialmente la velocidad del aire  $v_a$  es cero.



**Figura 3** Observador y fuente de sonido, separados una distancia  $l$  dentro de un tubo, donde se puede mover el aire en el eje -X

Siendo  $c$  la velocidad del sonido en el aire y  $t$  el tiempo que tarda el sonido en viajar del emisor al receptor se tiene que:

$$c = \frac{l}{t} \quad (12)$$

### Movimiento del aire:

Si la velocidad del aire  $v_a$  (en dirección al receptor) es diferente de cero, la velocidad efectiva  $c_e$  del sonido entre la fuente y el receptor estará dada por:

$$c_e = c + v_a \quad (13)$$

Ecuación que, al despejar  $v_a$ , substituir  $c$  y  $c_e$  por expresiones análogas a la ecuación (12), se obtiene:

$$v_a = \frac{l}{t'} - \frac{l}{t} \quad (14)$$

Donde  $t'$  es el tiempo que tarda la onda sonora en recorrer la distancia  $l$  cuando  $v_a \neq 0$ .

Rescribiendo la ecuación anterior en términos de  $t$  y  $\Delta t$  ( $\Delta t = t - t'$ ) se obtiene que:

$$v_a = \frac{l}{t - \Delta t} - \frac{l}{t} = \frac{l\Delta t}{(t - \Delta t)t} \quad (15)$$

Ecuación que, expresada (con ayuda de la ecuación 12) en función de las variables  $c$ ,  $l$  y  $\Delta t$  toma la forma

$$v_a = \frac{c\Delta t}{\frac{l}{c} - \Delta t} \quad (16)$$

Con la fuente y el receptor fijos  $v_f = v_o = 0$  substituidos en la expresión (11)  $f_o = f_f \left( \frac{c - v_a + v_o}{c - v_a + v_f} \right)$

obtenemos  $f_o = f_f$  es decir no cambia la frecuencia. Pero en cambio hay un corrimiento de fase que refleja el hecho de que la velocidad efectiva  $c_e$  del sonido dentro del tubo es mayor y la onda tarda menor tiempo en llegar al receptor. Si la diferencia de tiempo es  $\Delta t = t - t'$ , siendo  $t$  el tiempo de la onda con  $v_a = 0$  y  $t'$  el tiempo con  $v_a \neq 0$  entonces la velocidad del aire se deduce que es:

$$v_a = \frac{c\Delta t}{\frac{l}{c} - \Delta t} \quad (17)$$

Con la expresión (17) es posible determinar la velocidad del aire.  $\Delta t$  (en segundos) se mide en el osciloscopio observando el corrimiento de fase que ocurre al encender y apagar el aire,  $l$  es el largo del tubo (distancia entre el transmisor y receptor) y  $c$  la velocidad del sonido en el aire en reposo.

## Instrumental para Efecto Doppler.<sup>1</sup>

### Resumen.

En esta parte se describe el aparato y el procedimiento de operación del instrumental para la experiencia de **Efecto Doppler en ultrasonido y Ondas Estacionarias**

### Descripción.

El diagrama de bloques del instrumento indica las partes y la interconexión

Conecte o verifique que las conexiones del equipo están de acuerdo al diagrama de bloques.

Reconozca e identifique el transmisor y receptor de ultra sonido, los cables del suministro de potencia y los cables coaxiales que llevan la señal desde el transmisor o reflector hasta el “punto de conexión”. En este punto de conexión hay dos terminales BNC y un terminal de conexión serial. Este punto permite la conexión del aparato con un osciloscopio y con una computadora personal PC.

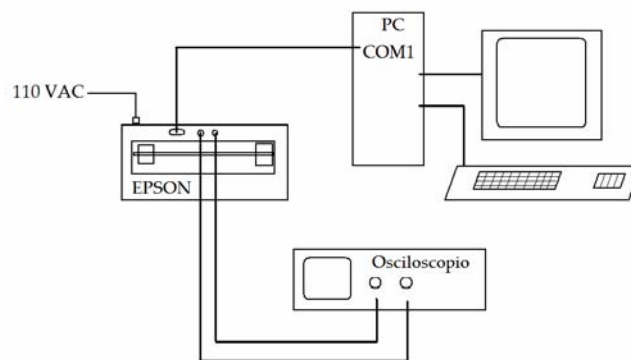
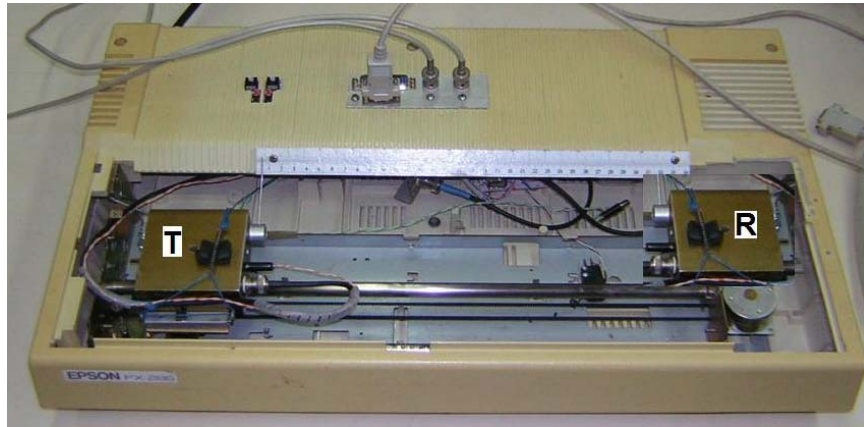


Diagrama de bloques del equipo para efecto Doppler.

La fotografía siguiente muestra el aparato: Una impresora EPSON modificada.

<sup>1</sup> El aparato fue construido por el Br. Andrés Sajo Castelli. Parte de la electrónica y el programa de control en LabView es debida al Br. Jesús Bastardo. El circuito electrónico del receptor y transmisor son debidos al Ing. Fernando Anzola. Experiencia desarrollada bajo la supervisión de los Profesores: Haydn Barros y Eduardo Greaves.



**OJO: Verifique que los conectores de potencia del transmisor y receptor estén bien enchufados!**

Identifique el carro que se mueve a lo largo de la barra de guía, el apuntador y la escala lineal. El carro se lo puede deslizar con la mano a lo largo de la barra de guía.

Ambos el transmisor y el receptor se pueden levantar de su sitio. Esto es necesario para algunas de las experiencias. Al levantarlos quedan unidos al aparato mediante los cables de suministro y los cables coaxiales de señal. También es posible intercambiar de posición el transmisor y el receptor. Para esto desconecte cuidadosamente los cables.

Afloje o levante el sistema de fijación del carro móvil y retire las unidades.

Por favor. Al terminar su experiencia deje la unidad de transmisor y receptor debidamente conectada con los cables en el aparato EPSON.

Observe que el transmisor tiene un control: El interruptor PULSO-CONT el cual controla el modo de operación. En CONT el transmisor produce un tren continuo de ultra sonido y se enciende un LED indicador. En PULSO el generador produce pulsos cortos de ultrasonido.

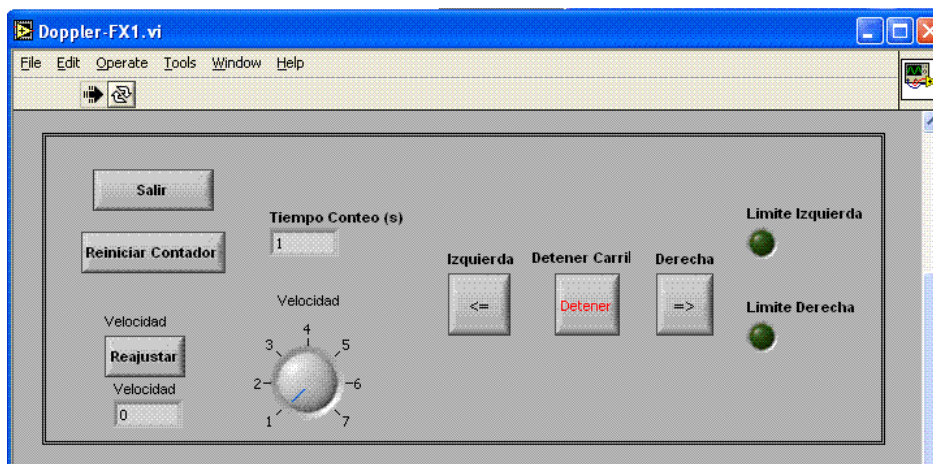
**Operación del aparato**

Encienda la impresora EPSON. Al encender la impresora se encienden la fuente de suministro para el movimiento del carro así como del transmisor de ultrasonido y del receptor de ultrasonido. Al encender la impresora EPSON usualmente el carro se mueve hasta un extremo. Proceda a encender el osciloscopio y verificar la conexión de los cables coaxiales desde el instrumento EPSON hasta el osciloscopio.

Observe las señales de ultrasonido en el osciloscopio. Ajuste los controles del osciloscopio adecuadamente para ver la señal del transmisor y del receptor como un tren de ondas continuo con varias oscilaciones en pantalla.

Encienda la PC y seleccione como usuario “ESTUDIANTE 1”

Active el icono DOPPLER. La pantalla que aparece se muestra a continuación:



El control de velocidad del carro se opera con el ratón. Hay 7 velocidades programadas las cuales disminuyen ligeramente con el **aumento** del número: La velocidad es mayor para números menores y viceversa.

Para activar el movimiento:

- 1.- Seleccione una velocidad.
- 2.- Pise REAJUSTAR.
- 3.- El carro se mueve a la IZQUIERDA o a la DERECHA pisando los botones respectivos. Al final del trayecto hay unos micro interruptores que detienen el movimiento. También se puede detener el movimiento pisando el botón DETENER.
- 4.- Para cambiar la velocidad hay que: A.- Detener el movimiento. B.-Cambiar la velocidad. C.- pisar REAJUSTAR, D.- Iniciar el movimiento de nuevo.

El "TIEMPO DE CONTEO" es un cronómetro: En él aparece el tiempo (en segundos) que el carro ha estado en movimiento.

## Experiencia<sup>2</sup>

### Parte A.- Medida de la frecuencia del ultrasonido y la velocidad del sonido.

Para la mayor parte de la experiencia es necesario que el transmisor y el receptor se encuentren, adecuadamente, sintonizados. Este es un ajuste interno del instrumento **que ya está hecho**.



**FIGURA 4.** Trasmisor T y receptor R en posición para sintonizarlos.

- a) Proceda a colocar el receptor y transmisor uno en frente al otro en la geometría indicada en la figura 4.(Ya sea con los módulos transmisor y receptor dentro de la impresora EPSON o fuera de ella)
- b) Ajuste el osciloscopio de manera de ver las señales del transmisor en el canal 1 y del receptor en el canal 2 del osciloscopio. Sincronice el osciloscopio con la señal de transmisor. (Trigger en Ch. 1). Observe lo que ocurre si se cubre con un dedo el sensor en el receptor.
- c) Determine la frecuencia de las ondas ultrasónicas determinando el periodo de la onda.
- d) Traslade el transmisor o receptor acercándolos o alejándolos. Observe las señales en el osciloscopio.
- e) Traslade el transmisor (o Receptor) un número entero de longitudes de onda. Mida el traslado realizado y determine la longitud de onda en el aire de las señales de ultrasonido. Usando este valor y la frecuencia determine la velocidad del sonido. Coincide este resultado con el valor que Ud. esperaría?

---

<sup>2</sup> Los instrumentos utilizados para esta experiencia han sido construidos por estudiantes y han sido modificados con respecto a los prototipos originales. Por ello puede haber ligeras variantes en los equipos con respecto a lo descrito en esta guía.

## Parte B.-Efecto Doppler:

### Movimiento del transmisor o el receptor

- a) Coloque el transmisor o receptor en el aparato EPSON haciendo las conexiones indicadas en el diagrama que describe el aparato.
- b) Dispare (Trigger) el osciloscopio con la señal recibida en el canal 1 de forma que el barrido del osciloscopio esté sincronizado con la señal del transmisor.
- c) Ajuste el barrido hasta observar en la pantalla del osciloscopio de 2 a 6 ondas completas de las señales provenientes del transmisor y del receptor. Determine la frecuencia de las ondas.
- d) Acerque lentamente el receptor hacia el transmisor mientras observa la pantalla. Que observa?. Explique. Aleje lentamente el receptor del transmisor. Que observa? Explique.
- f) Haciendo uso del programa DOPPLER de control en la PC, ponga en movimiento el transmisor o receptor. Determine la velocidad de traslación del transmisor (o Receptor):

A) Mediante el efecto Doppler observado en el osciloscopio. (Ver: **Nota importante** a continuación).

B) Directamente midiendo el tiempo requerido para un desplazamiento dado.

Invierta las posiciones del transmisor y receptor y repita la experiencia. Coinciden los resultados? Cuáles son los límites de error? Haga una tabla con todas sus medidas y con los resultados.

### **Nota importante.**

Usted ha visto que es posible observar simultáneamente en el osciloscopio la señal del transmisor y la señal del receptor. Supongamos que el barrido del osciloscopio está sincronizado con el transmisor. Cuando la frecuencia de ambas señales es idéntica se observa que las ondas no se mueven relativamente. En cambio si las frecuencias difieren ligeramente existirá un movimiento relativo entre ellas. Un cambio de fase continuo. Supongamos que el transmisor tiene  $f = 40\,000$  Hz y el receptor  $t = 40001$  Hz se observará que la señal del receptor se mueve en relación a la del transmisor a una tasa de una (1) onda por segundo.  $2\pi$  (o  $360^\circ$  por segundo). Es decir observando la tasa de velocidad relativa de las ondas en el osciloscopio, es posible determinar cambios muy pequeños de frecuencia (en el caso anterior es un cambio de  $1/40.000!$ ). Al cambiar la frecuencia cambia el período de la onda; sin embargo no es posible observar en la cara del osciloscopio un cambio del período tan pequeño (Por ejemplo: Si el barrido es  $2\ \mu\text{s}/\text{cm}$ , el período la onda que se observa en el osciloscopio, tiene 7 cm. Luego un incremento de  $1/40000$  en la frecuencia produce una disminución en el período observado de  $7/40000$  cm, o sea  $0,175 \times 10^{-3}$  mm!)

Si se hace un **traslado** del transmisor (o el receptor) **una distancia** igual a una longitud de onda, se observará en el osciloscopio un movimiento relativo entre la señal del transmisor y el receptor de un período exactamente. En cambio si se mueve a velocidad constante el transmisor o el receptor, se observará en el osciloscopio un movimiento relativo constante entre las dos señales (Por ejemplo 1 período por segundo = 1 Hz). Este movimiento relativo constante de las señales en el osciloscopio es debido al cambio de frecuencia por efecto Doppler. La forma mas sencilla de medir el corrimiento de frecuencia  $\Delta f = |f_f - f_o|$  es observar las figuras de Lissajous. Coloque el barrido del osciloscopio en la posición X-Y y ponga en movimiento relativo el transmisor y receptor. Determine la tasa de cambio de la fase contando un número adecuado de cambios de fase (Por ejemplo: 10 cambios de fase y determine el tiempo transcurrido  $T$ . Luego:  $\Delta f = 10/T$ ).

## Movimiento del aire

Para esta parte de la experiencia es necesario sacar del aparato EPSON el transmisor y receptor.

- Coloque entre el transmisor y el receptor el tubo de PVC acoplado al ventilador. El extremo cerrado con un plástico por donde se extrae el aire debe acoplarse directamente al módulo. El extremo opuesto debe quedar a unos 5 cm del receptor.
- Ajuste el osciloscopio de manera que el barrido esté sincronizado con la señal del transmisor.
- Encienda el ventilador. Que observa? Haga varias medidas del corrimiento de la onda cuando se enciende y se apaga el ventilador.

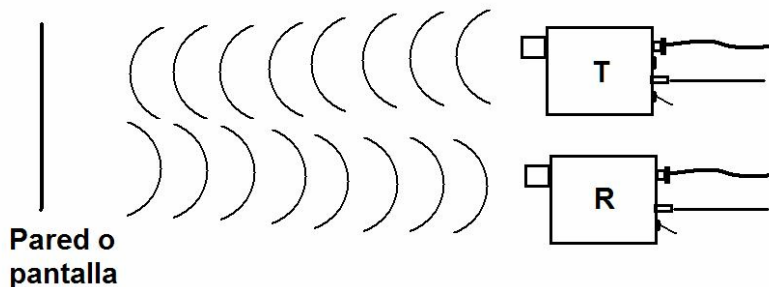
Obtenga el promedio de sus medidas de corrimiento  $\overline{\Delta t}$ . A qué se debe este corrimiento?

- Mida la distancia entre el transmisor y el receptor.
- Calcule la velocidad del aire en el tubo. Calcule el límite de error. Son razonables los resultados?
- La medida de la velocidad del aire fue hecha con ondas ultrasónicas. Debido a la semejanza entre fenómenos ondulatorios. No podría hacerse una experiencia semejante con microondas? Hay algún inconveniente fundamental?
- En la experiencia se midió de una forma sencilla la velocidad del sonido. No podría medirse la velocidad de la luz de la misma manera usando microondas? Haga cálculos numéricos para formular su respuesta.

## Parte C.- Radar ultrasónico (sonar)

La figura 5 indica el montaje para la experiencia de radar ultrasónico. Para obtener resultados satisfactorios es necesario ser cuidadoso con los ajustes indicados a continuación:

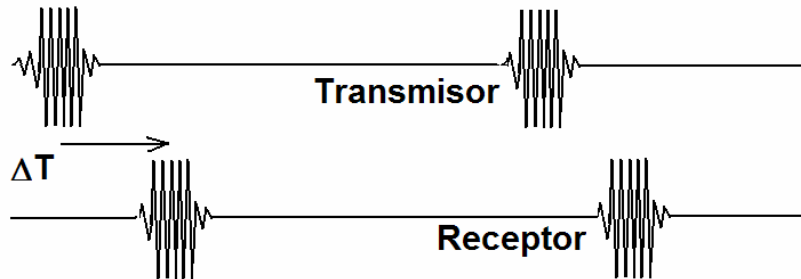
- Coloque el interruptor **PULSO/CONT** que tiene el transmisor en pulso.
- Ajuste en el osciloscopio la base de tiempo (Barrido horizontal) y la ganancia (Vertical) hasta observar la señal parecida a la figura 6. Las Señales de ambas unidades deberían ser aproximadamente de igual duración.



**FIGURA 5.** Montaje para la experiencia de radar ultrasónico.

c) Mida la distancia transmisor-blanco-receptor. En el osciloscopio: mida el retardo de la señal del receptor con respecto al transmisor y conociendo la velocidad del sonido deduzca la distancia del blanco. Coinciden sus resultados?

d) Repita la experiencia anterior con el blanco a distintas distancias. Para blancos lejanos es conveniente colocar la bocina en el receptor. Reporte los resultados de sus experiencias en tablas apropiadas.

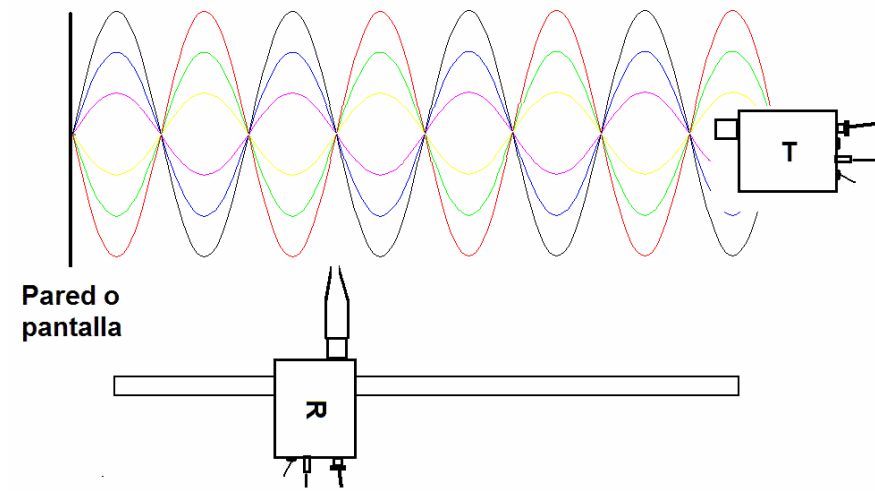


**FIGURA 6.-** Señales en la pantalla del osciloscopio

**Parte D.- Ondas Estacionaria.**

a) Realizar el montaje indicado en la figura 7. El transmisor y reflector deben colocarse con una separación de aproximadamente 1 metro. El receptor con una bocina convergente se coloca sobre un jinete en un banco óptico.

b) La distancia transmisor-reflector **debe ser un múltiplo de  $\lambda/2$**  para obtener ondas estacionarias. Esto se logra, empíricamente, moviendo el transmisor unos milímetros hacia adelante o atrás hasta la posición que produzca máxima señal en el receptor (Durante este ajuste modifique la ganancia del receptor de forma que la señal no sea cero ni tampoco esté saturada). **Nota:** Este ajuste es importante para poder observar las ondas estacionarias.



**Figura 7.** Montaje para medir las ondas estacionarias.

c) Coloque una cinta de papel de 1 cm. de ancho y 25 cm. de largo en el banco óptico, debajo del jinete que soporta el receptor, a lo largo del banco óptico observando las variaciones de la señal. Máximos corresponden a vientres mínimos a nodos.

d) Marque con un lápiz, sobre la cinta de papel, las posiciones sucesivas de 20 nodos ( ó 20 vientres) de la onda estacionaria, y de estas posiciones determine la longitud de la onda estacionaria ultrasónica. (También es posible anotar las posiciones de los mínimos mediante la escala del banco óptico).

e) Observe la señal del receptor en el osciloscopio. Mida el período de las ondas y deduzca la frecuencia de ésta.

f) A partir de las medidas anteriores deduzca la velocidad del sonido en el aire. Coincide este resultado, dentro de los errores, con los resultados anteriores?

g) Escriba la ecuación de la onda estacionaria (deje indicado mediante un símbolo la amplitud  $y_m$ )

### **Agradecimientos**

El diseño conceptual y realización de esta experiencia es debida al Prof. Eduardo Greaves. La USB le agradece encarecidamente a la empresa **Hewlett Packard de Venezuela**, por la donación de equipos de computación y fondos para desarrollos del proyecto, (Año 2007) con los cuales se financió la implementación de esta experiencia.

### **Referencias:**

1.- M. Alonso y E. J. Finn. Física Vol. II Campos y Ondas. Fondo Educativo Interamericano S.A. México, 1976. Efecto Doppler: Sección 18.13

2.- Sears y Zemansky. Física. Aguilar Madrid 1971. Fenómenos acústicos: Cap. 23 Efecto Doppler. Sección 23 - 9.

3.- F. W. Sears, M. K. Zemansky, H. D. Young y R. A. Freedman. Fisica Universitaria. Pearson Education Mexico 2005. Volumen 1, Sec. 16.8, pp 621 a 627. Discute el efecto Doppler en sonido; Volumen 2, Sec. 37.6, p. 1423. Discute el efecto Doppler en la Luz.

4.- Resnick y Halliday. "Física para estudiantes de Ciencias e Ingeniería: Sección 20-7. John Wiley Sons Inc. New York 1961. Ondas de Sonido: Cap. 20. Efecto Doppler: Sec. 20-7

5.- Resnick y Halliday. Parte 2 en español (el verde) Compañía editorial Continental SA Mexico 1985. Seccion 42-5, p.390. Discute fundamentalmente el efecto Doppler en la luz.

6.- [http://en.wikipedia.org/wiki/Doppler\\_effect](http://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_effect)

7.- [http://www.school-for-champions.com/science/sound\\_doppler\\_equations.htm](http://www.school-for-champions.com/science/sound_doppler_equations.htm)

**Tabla comparativa de características de ondas de ultrasonido, microonda, luz visible y ondas acusticas.**

TIPO DE ONDA	CLASIFICACIÓN DE LA ONDA POR SU NATURALEZA FÍSICA	CLASIFICACIÓN DE ACUERDO A LA DIRECCIÓN DE PROPAGACIÓN	PRESENTA EL FENÓMENO DE POLARIZACIÓN	RANGO DE LONGITUD DE ONDA (METROS)	RANGO DE FRECUENCIA DE LA ONDA (HZ)	VELOCIDAD DE LA ONDA M/SEG.	NECESITA MEDIO PARA PROPAGARSE
<b>Ultrasonido</b>	Mecánica	Longitudinal	no	$5 \times 10^{-7}$ - $1.6 \times 10^{-2}$	$2 \times 10^4$ - $6 \times 10^8$	(en al aire para $f= 40$ $KH_z$ ) 320	si
<b>Microonda</b>	Electromagnética	Transversales	si	$1 \times 10^{-3}$ - $1 \times 10^{-1}$	$1 \times 10^9$ - $1 \times 10^{12}$	$3 \times 10^{-8}$	no (vacio)
<b>Luz visible</b>	Electromagnética	Transversales	si	$4 \times 10^{-7}$ - $6.9 \times 10^{-7}$	$10^{14}$ - $10^{15}$	$3 \times 10^{-8}$	no (vacio)
<b>Acústica</b>	Mecánicas	Longitudinales	no	$1.6 \times 10^{-2}$ - $1.6 \times 10^{-2}$	$2 \times 10^1$ - $2 \times 10^4$	326	si

## *EL INFORME DE LABORATORIO*

### **OBJETIVO**

- Ilustrar al estudiante sobre la redacción de un informe convenientemente estructurado y enfatizar la importancia de la comunicación escrita del trabajo experimental..

### ***I. Motivación***

Para un científico o un ingeniero, es de vital importancia el desarrollar la capacidad de comunicar sus resultados en forma oral y escrita, de modo que sean comprensibles aún por personas no involucradas directamente con el trabajo experimental.

El informe escrito suele ser el único material tangible que se le presenta a los superiores, clientes o colegas, y de él dependerá la valoración de la actividad profesional, así como también la toma de decisiones por parte de otras personas. De la misma manera, el informe escrito será la herramienta fundamental de evaluación de su actividad durante los cursos de laboratorio.

Antes de pasar a detallar la estructura general del informe, queremos enfatizar que la *habilidad para la interpretación, relación y discusión de los resultados* es el rasgo distintivo de científicos o ingenieros capaces y pensantes.

### ***II. El Informe***

El informe deberá ser claro, conciso y bien estructurado. Igualmente debe ser explícito y argumentado; en particular, debe presentar los resultados haciendo uso de figuras, tablas y ecuaciones, enmarcadas dentro de un discurso que muestre su pertinencia o relevancia.

El informe debe explicar el contexto dentro del cual está enmarcado el trabajo en cuestión y también debe analizar y discutir los resultados. Todas las ecuaciones, tablas, figuras y gráficas deben numerarse y ser referidas por el texto. La no alusión a alguna de ellas es señal de que es prescindible. Finalmente, apuntamos que el informe se escribe de modo que otros colegas sin un conocimiento previo del experimento o problema sean capaces de entenderlo plenamente. Por ello, el informe debe ser autocontenido.

A continuación presentamos un modelo para la redacción del informe de laboratorio:

### **1. Hoja de presentación.**

Título de la práctica e identificación del autor o autores.

### **2. Introducción.**

Definición del problema investigado. Debe brindarse una idea o panorama general así como también una breve reseña de los resultados y conclusiones más significativos reportados por otros autores. La *introducción* debe concluir indicando de manera clara y concisa el propósito y la finalidad de la experiencia (o investigación) y los contenidos del informe.

### **3. Fundamento teórico.**

Debe presentar el modelo teórico que permite describir el fenómeno estudiado y las ecuaciones asociadas. La teoría puede predecir resultados o bien puede explicarlos.

### **4. Esquema del procedimiento experimental.**

Debe presentarse el método usado para solucionar el problema que se aborda y dar una idea clara de cómo se ha realizado el experimento. Se ha de describir del montaje experimental (incluyendo esquemas y/o dibujos). Debe indicarse el rango y apreciación de los instrumentos de medición; también deben darse otros detalles que puedan ser de relevancia en el contexto de la práctica, como características particulares de los equipos. Esta sección debe brindar la información requerida por el lector para reproducir los resultados, si así lo desea.

### **5. Resultados experimentales.**

Los resultados de las mediciones (tablas) y su subsiguiente procesamiento (gráficos y ajustes de curvas) deben ser agrupados lógicamente. Toda tabla y todo gráfico debe tener su leyenda la cual debe contestar la pregunta: ¿Qué es

este gráfico? ¿Que es esta tabla? Debe enfatizarse (nuevamente) que toda cantidad calculada a partir de cantidades medidas debe estar acompañada *siempre* de su respectivo error, obtenido vía propagación. Si algunos resultados provienen de la repetición de un mismo cálculo a partir de datos tabulados, es conveniente presentarlos a su vez en forma tabulada. En este caso debe mostrarse un cálculo tipo para ilustrar cómo se obtienen los resultados.

## **6. Discusión y conclusiones.**

Esta es la sección más importante del informe. Sin embargo, no es posible dar un esquema para un proceso intelectual como el de relacionar y discutir resultados con miras a concluir creando conocimiento o información; por lo anterior nos limitamos a apuntar que esta sección debe comprender al menos las siguientes consideraciones:

- a) Una discusión de la precisión de los resultados. En particular debe discutirse la influencia de los errores (instrumentales y de observación) y las medidas adoptadas para disminuirlos.
- b) Debe compararse el resultado experimental y la predicción teórica. Deben discutirse las discrepancias surgidas debido a las idealizaciones utilizadas para predecir algún resultado y la influencia de limitaciones físicas en el resultado real.
- c) Cada curva debe ser discutida y explicada: debe siempre determinarse el posible significado de la forma de la curva, del área bajo la misma, de la dependencia (lineal o no) de una variable con respecto a otra.
- d) Las dificultades experimentales pueden comentarse, así como también las posibles mejoras que se le puedan hacer a la solución experimental del problema. También pueden sugerirse ideas y posibles desarrollos al lector.

## **7. Bibliografía.**

Nombre y autor(es) de los libros (y otras publicaciones) en los cuales se apoyó la realización o interpretación de la práctica o experiencia.

## **8. Apéndices.**

Debe incluir las propagaciones de error así como también otros detalles que, por razones de claridad en la presentación, no se incluyen en el texto principal del informe.

## *USO DE LA COMPUTADORA EN EL LABORATORIO*

### **OBJETIVO**




- Dar al estudiante algunos lineamientos básicos para el uso de la computadora en el laboratorio.




### ***I. Introducción***

Estos laboratorios incorporan la computadora como herramienta básica del trabajo experimental. Por tal hecho se considera absolutamente necesario que el estudiante se familiarice con **su uso adecuado y las facilidades que ella ofrece**.

Durante las sesiones de práctica se utilizarán diversos programas o software bajo ambiente Windows. Estos se clasifican en dos grupos: El primero formado por herramientas básicas para el análisis de datos y el segundo grupo integrado por aplicaciones orientadas a cada experiencia.







### ***II. Uso del computador***

1. ENCENDIDO (ON): Encienda el regulador, CPU y Monitor. Espere que culmine de iniciar y aparezca la pantalla de bienvenida de Windows. 
2. INICIO DE SESION (LOGIN): Seleccione la cuenta de estudiante haciendo “click” sobre ella, para comenzar a trabajar. 
3. UBICACIÓN Y ACCESO A PROGRAMAS: Los programas a utilizar en el laboratorio se encuentran como accesos directos dentro del menú de inicio de Windows. 

4. GUARDAR INFORMACION: Para almacenar información seleccione la opción “guardar” de la aplicación que este utilizando, para esto  dispone de la carpeta de mis documentos.
5. IMPRIMIR: Antes de imprimir verifique la disposición y el contenido  de los datos, utilizando la opción **vista preliminar**. Para imprimir selecciones la opción “imprimir” del menú de herramientas. 
6. APAGADO (OFF): Seleccione la opción apagar equipo ubicada en el menú de inicio, confirme “apagar”, luego apague el monitor.



## 7. Normas en el uso de las computadoras

- 7.1 No se permite la instalación de software a los usuarios, ni modificar el existente.
- 7.2 Está prohibido mover de su lugar los equipos de  computación.
- 7.3 No fumar ni consumir ningún tipo de alimentos o bebidas   dentro de los laboratorios.
- 7.4 No es recomendable utilizar borradores ni saca puntas cerca de los teclados y  mouse de los computadores.
- 7.5 El estudiante es responsable del equipo que este utilizando. El uso indebido o perdida de algún accesorio será su  responsabilidad.
- 7.6 Se prohíbe de manera expresa la consulta a sitios web de  contenido pornográfico, salas de chat y juegos.
- 7.7 Contribuir al cuidado y conservación de las instalaciones y equipos.
- 7.8 Notificar al personal encargado cualquier irregularidad en los equipos.
- 7.9 Al terminar la sesión apagar correctamente todos los equipos.

### III. Excel Básico:

#### 1. Conociendo Excel

- Qué es Excel:

Excel es un programa de hoja de cálculo que nos ayuda a realizar cálculos estadísticos, matemáticos, financieros, creación de gráficas, vínculos entre hojas de cálculo; entre otras utilidades que podemos encontrar.

- Entorno de trabajo:
- 

Cuando inicia Excel, abre la pantalla estándar como se muestra en la figura 1.

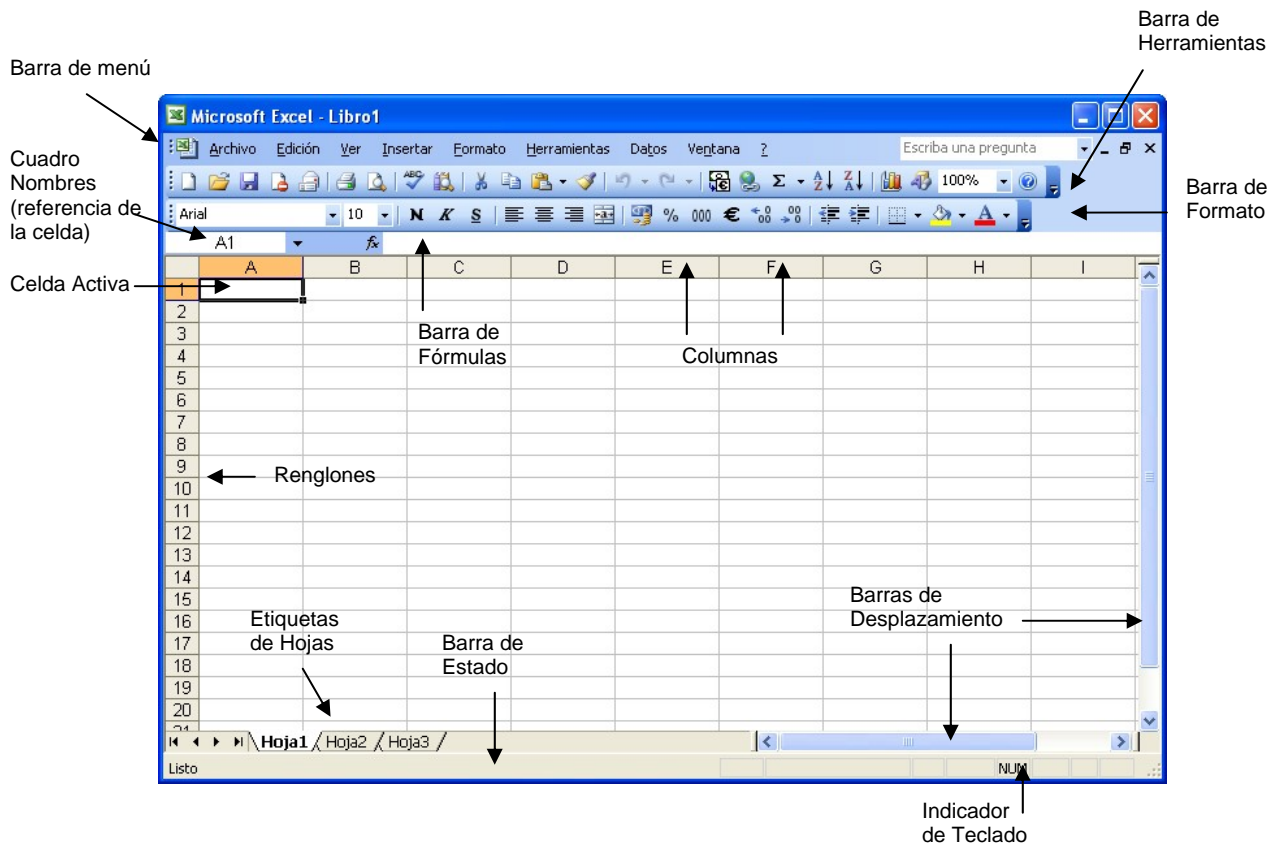


Figura 1.

Excel se compone por el libro de trabajo que es el mismo archivo, cuando comenzamos a trabajar se genera el Libro1 conforme se abre otro archivo genera el Libro2 y así sucesivamente. Cada libro consta de varias hojas, por lo general aparecerán 3 hojas. Como cualquier archivo se puede grabar con el nombre deseado y la extensión xls; también a las hojas se les puede dar un nombre.

Cada hoja contiene 256 columnas y 65536 renglones por lo que tenemos un espacio bastante amplio para trabajar. Una celda es la intersección de cada columna con cada fila. La celda activa es la celda seleccionada, para saber la referencia de la celda activa, podemos verla en el cuadro de nombres en la parte superior izquierda de la pantalla,

como se puede observar en la Figura 1. Como en todos los programas de Office se tienen las 3 diferentes barras: menú, herramientas y formato.

## **2. Introducción de Datos**

Una hoja de cálculo es el documento principal que se utiliza para el almacenamiento y manipulación de datos. Cada una es una cuadrícula rectangular conformada por filas y columnas. La intersección entre cada columna y cada fila es una celda, que es la unidad básica de la hoja de cálculo en la cual se almacenan los datos. Si desea crear una hoja de cálculo nueva haga clic en la opción Nuevo del menú Archivo o presione el botón Nuevo en la barra de herramientas estándar. Para grabar los cambios haga clic en la opción Guardar del menú Archivo o presione el botón Guardar en la barra de herramientas estándar

Para introducir datos en una celda, haga clic en la celda en la que desee introducir los datos. Escriba los datos y presione INTRO o TAB. Utilice una barra o un guión para separar las partes de la fecha; escriba, por ejemplo 9/5/96 o Jun-96. Para introducir una hora según el horario de 12 horas, escriba un espacio y, a continuación, a ó p detrás de la hora, como por ejemplo, 9:00 p. De lo contrario, Microsoft Excel introducirá la hora como a.m.

## **3. Ordenación de Datos**

La ordenación nos puede servir para cuando tenemos un listado que se requiera organizar para una mejor visión de los datos. Si se trata de datos textuales, la ordenación se realiza alfabéticamente en forma ascendente o descendente, y los datos numéricos se ordenan de menor a mayor o viceversa.

La ordenación se realiza en base a tres criterios, tomando en cuenta antes el primer criterio, en caso de haber dos criterios iguales, toma en cuenta el segundo criterio para ordenar.

Debemos hacer los siguientes pasos:

1. Seleccionar la lista a ordenar
2. Elegir el menú DATOS-ORDENAR
3. Seleccionar los criterios a ordenar
4. Seleccionar si se ordenan en forma ascendente o descendente
5. Si se tiene encabezado de la lista activar la casilla, si no tiene, aparecerá en los criterios como columna A, B, C.

## **4. Fórmulas**

- Fórmulas en Excel

Las fórmulas nos ayudan a obtener un resultado de cualquier cálculo que se realice. Además de contar con funciones predeterminadas que también nos facilitan a realizar otras operaciones.

- Elementos de una fórmula

Para que Excel identifique que se realizará una fórmula o una función debemos comenzar siempre con el signo igual “=”.

Una fórmula se compone de varios elementos:

1. Referencia de celdas
2. Valores
3. Operadores
4. Funciones

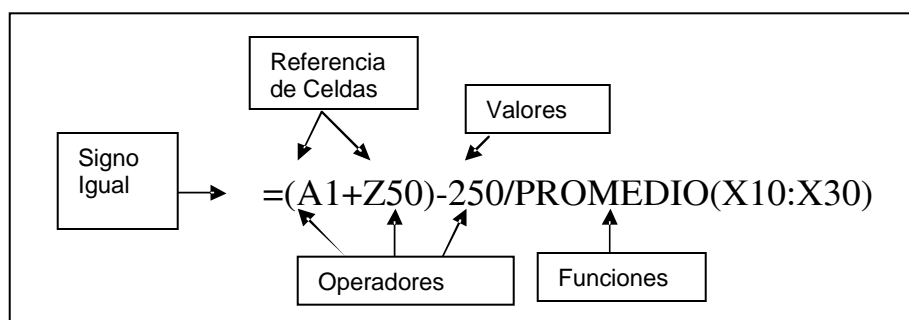


Figura 2.

ELEMENTOS	DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
Referencia de celdas	Cualquier celda que contenga un valor numérico	A1, Z50, G60:M70
Valores	Cualquier valor numérico que sea constante	25, 15%, 200
Operadores	Especifican la operación que se va a realizar con los valores o la referencia de las celdas	+, -, *, /
Funciones	Fórmulas predeterminadas para realizar cálculos estadísticos, matemáticos, financieros, lógicos, etc.	Promedio, Suma, Tasa, Fecha, Producto, etc.

- Ejemplo

	A	B	C		A	B	C
1		lado 1	lado 2	1	se entra texto		se entra texto
2	Medida 1	12,5	8,3	2	se entra texto	se entra número	se entra número
3	Medida 2	11,8	9,2	3	se entra texto	se entra número	se entra número
4	Medida 3	13,1	7,9	4	se entra texto	se entra número	se entra número
5	Medida 4	12,4	8,7	5	se entra texto	se entra número	se entra número
6	Media	12,5	8,5	6	se entra texto	=SUMA(B2:B5)/4	=SUMA(C2:C5)/4
7	Error med.	0,2	0,2	7	se entra texto	=DESVESTP(B2:B5)/RAIZ(4)	=DESVESTP(C2:C5)/RAIZ(4)
8	error relat.	1,9	2,8	8	se entra texto	=100*B7/B6	=100*C7/C6

Figura 3.

En el esquema se muestra del lado izquierdo el contenido propiamente dicho de las celdas de la hoja de cálculo, y, en el lado derecho, el tipo de función que se realiza. Por ejemplo, en toda la columna A y en toda la fila 1 se entran textos; en el rango definido por las celdas B2:C5 se entran números; en las celdas B6 y C6 se calcula la media aritmética de los cuatro números contenidos en los rangos B2:B5 y C2:C5, en el primer caso usando la función SUMA del rango correspondiente, y en el segundo listando las celdas a sumar, y en ambos casos dividiendo entre la constante 4; en las celdas B7 y C7 se inserta la función DESVESTP, que calcula la desviación estándar de una población, y se divide entre RAIZ(4), que es la raíz cuadrada de 4, para calcular el error absoluto de la media; y por último, en la celda B8, y en forma análoga en la celda C8, se multiplica el contenido de la celda B7 por 100 y se divide entre el contenido de la celda B6 para calcular el error porcentual de las cuatro medidas.

## 5. Creación de Gráficos

- Pasos para elaborar un gráfico

Para generar un gráfico, debemos realizar lo siguiente:

- Seleccionar los datos, tanto las categorías, la serie de datos y los títulos de la serie que será la leyenda en el gráfico.

	A	B
1	X	Y
2	1,25	1,77
3	2,55	3,01
4	3,9	4,55
5	4,85	6,01
6	5,5	6,44

Figura 4.

- Se puede seleccionar el menú INSERTAR - GRÁFICO o el botón Asistente para gráfico que se encuentra en la barra de tareas



1. Desplegará una pantalla donde se puede escoger el tipo de gráfico, de acuerdo a los datos. Presionar el botón **Siguiente>** cada vez que terminemos de seleccionar las opciones que nos presenta el asistente para gráficos.

2. El paso 2 de 4 nos permite seleccionar nuevamente el rango de datos y colocarlos por columnas o filas.

3. El paso 3 de 4 presenta más opciones como el escribir los títulos, agregar líneas de división, modificar el formato de la leyenda, agregar rótulos a los datos, insertar la tabla de los datos seleccionados.

4. El último paso nos presenta la opción de insertar el gráfico en la misma hoja donde seleccionamos los datos o insertarlo en otra hoja nueva.

Ver las siguientes figuras:

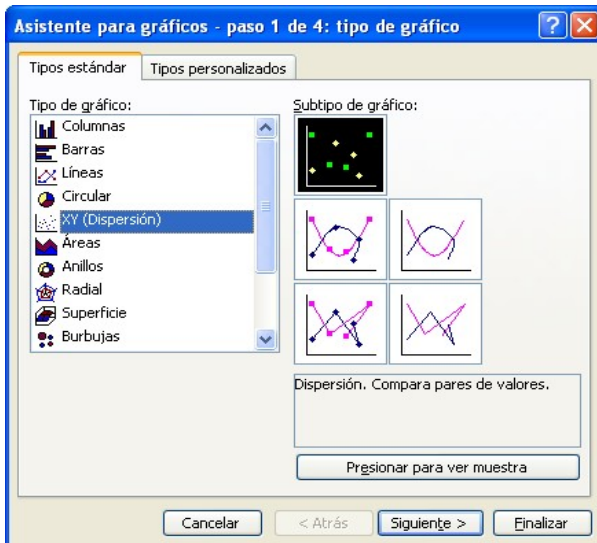


Figura 5: Paso 1

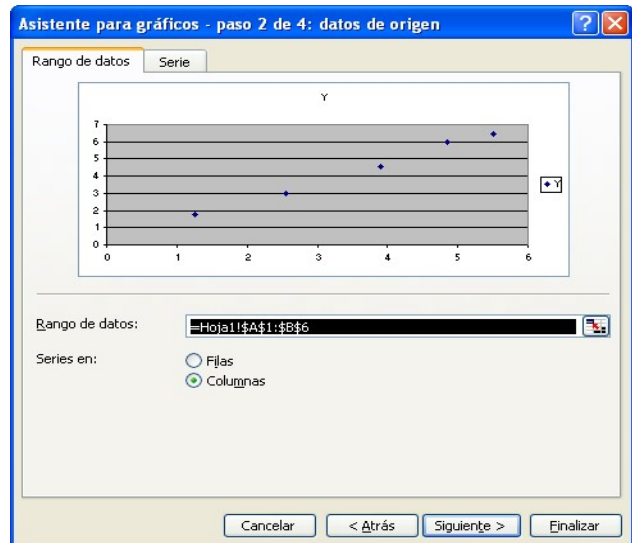
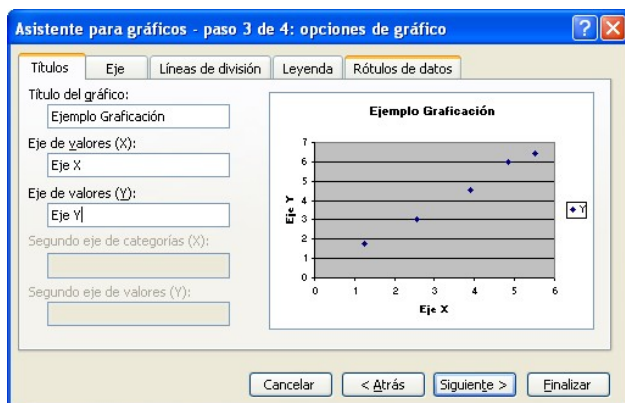


Figura 6: Paso 2



6. Trazado de Barras de Error:

Figura 7: Paso 3

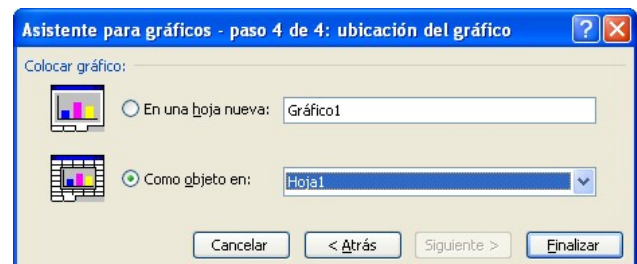


Figura 8: Paso 4

Las barras de error son una herramienta que permite mostrar el rango del desvío estándar de una medición experimental.

Supongamos estos datos ficticios:

	A	B	C	D
1	X	Y	Error X	Error Y
2	1.25	1.77	0.94	0.80
3	2.55	3.01	1.91	1.35
4	3.90	4.55	2.93	2.05
5	4.85	6.01	3.64	2.70
6	5.50	6.44	4.13	2.90

Figura 9

Con los datos del rango A1:B6 creamos este gráfico XY

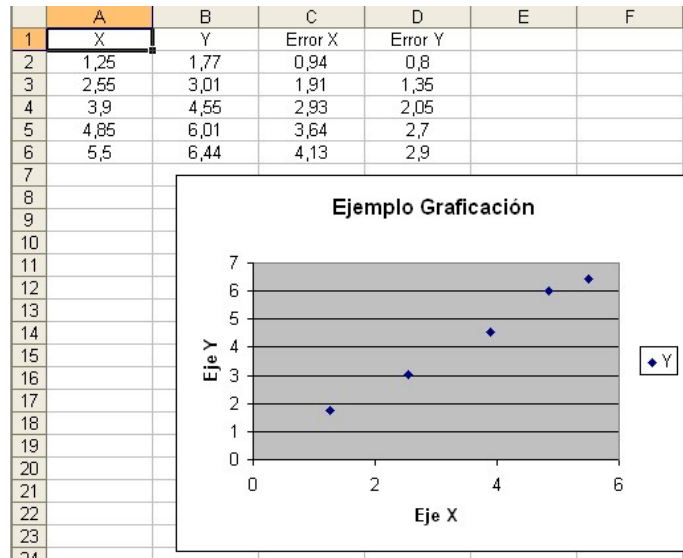


Figura 10

Para agregar barras de error a un gráfico, seleccionamos una de las series de datos haciendo click en cualquiera de los rombos azules de la gráfica y abrimos el menú de formato de series de datos:

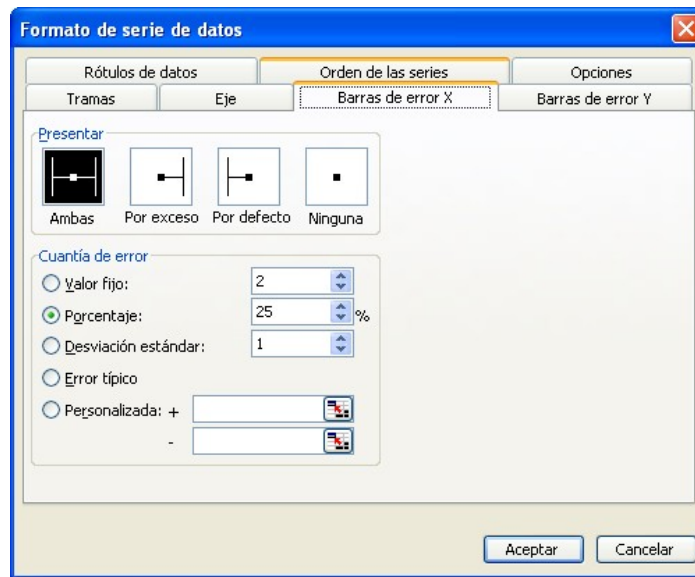


Figura 11

El diálogo cuenta con una pestaña para definir las barras de error de X y otra para definir las de Y.

En el cuadro de definiciones podemos elegir entre la presentación de la barra (ninguna, por exceso, por defecto o ambas) y la cuantía del error. Por ejemplo si definimos un error del 25% para cada punto en la ventanilla de Porcentaje y elegimos la opción Ambas en Presentar, veremos:

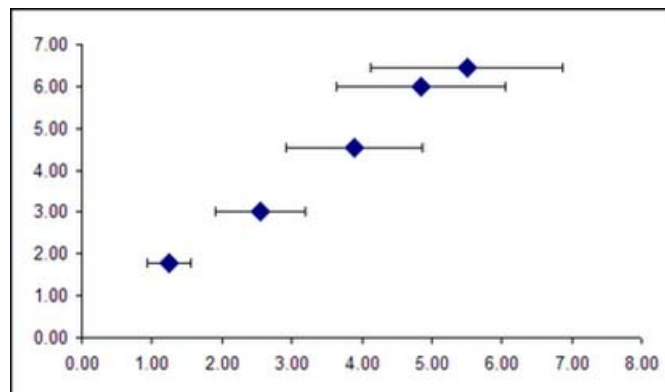


Figura 12

Excel ha agregado una línea a ambos lados de cada punto, que representan una desviación del 25% de este punto. Si agregamos el mismo error al valor de las Y obtendremos el siguiente resultado:

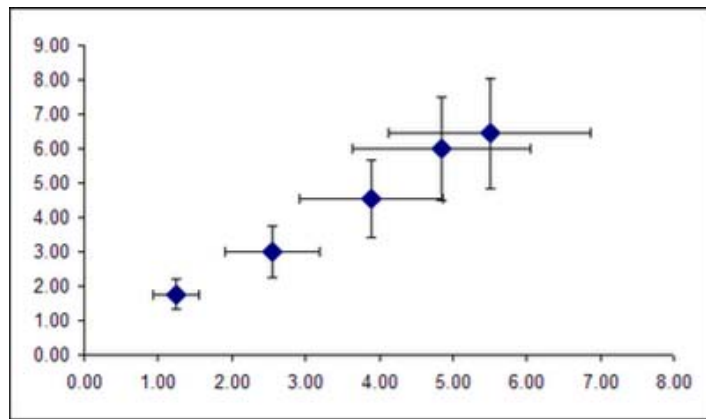


Figura 13

## 6. Ajuste de Curvas

Para realizar el ajuste de curvas en Excel se utilizan las **líneas de tendencia**, con la gráfica anterior podemos establecerlas como se muestra en la siguiente figura:

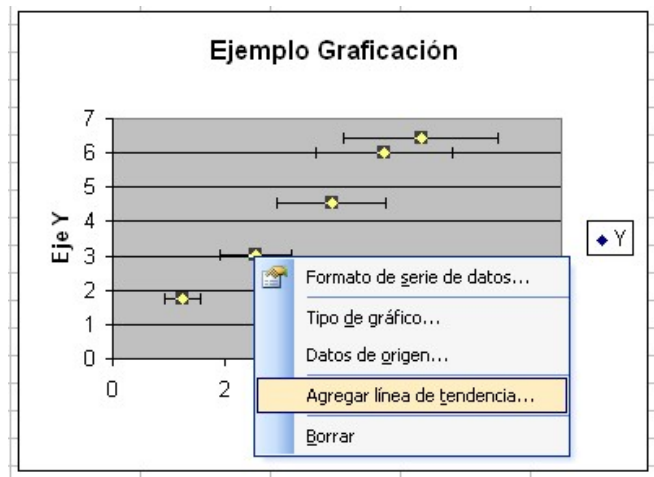


Figura 14

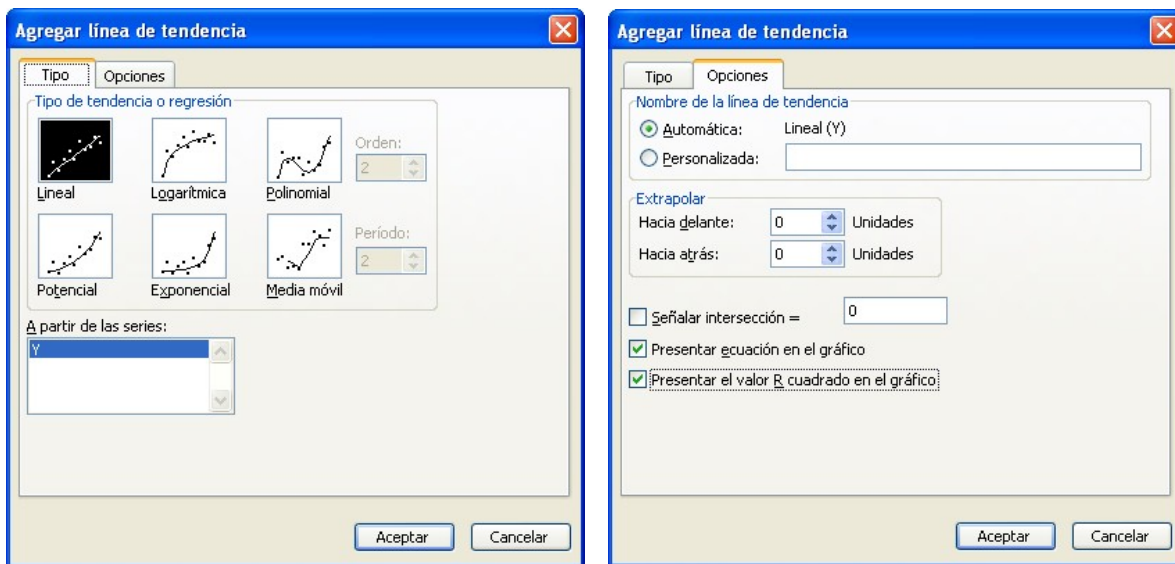


Figura 15

Seleccionamos el tipo de tendencia de las opciones disponibles: lineal, logarítmica, polinomial, etc. en la pestaña tipo, luego en la pestaña opciones seleccionamos las casillas de verificación para presentar ecuación en el gráfico y presentar el valor R. Cuando presione el botón aceptar, la línea que mejor ajuste es dibujada, la ecuación de la línea y el valor de R-cuadrado se mostrarán en el gráfico como se muestra en la figura a continuación. Usted puede mover la ecuación haciendo clic y arrastrando a la posición deseada.

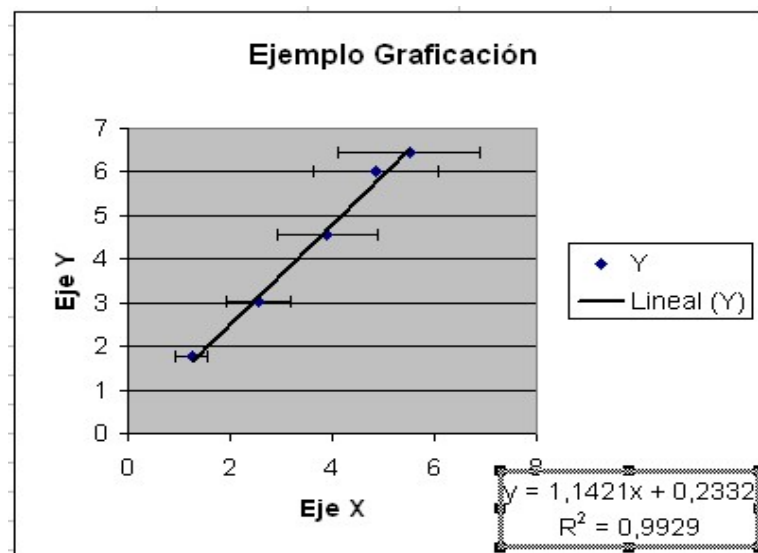


Figura 16

El valor R-cuadrado es realmente el cuadrado del coeficiente de correlación. El coeficiente de correlación R, nos da una medida de cuan adecuada es la relación lineal

entre los valores de  $x$  e  $y$ . Un valor de  $R = 1$  indica que la relación lineal entre los valores de  $x$  e  $y$  es exacta. Valores de  $R$  cercanos a 1 indican que una relación lineal es excelente. Si el coeficiente de correlación es relativamente lejano a 1, las predicciones basadas en la relación lineal  $y = mx + b$ , no serán confiables.

**Sugerencia:** Es recomendable establecer el formato de los números presentados en la fórmula, haciendo click en la misma y seleccionando la opción Formato > Formato de rótulo de datos, en la barra de menús, donde en la pestaña número pueden ajustarse el número de posiciones decimales como se muestra en la figura:

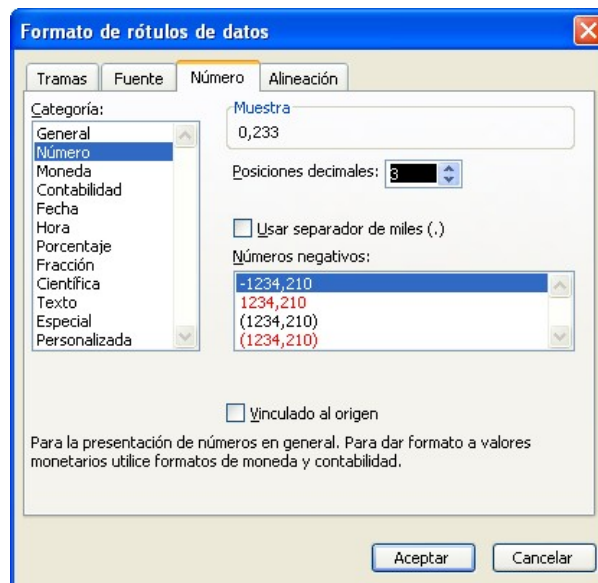


Figura 17

## 7. Errores del ajuste lineal

Para obtener en EXCEL los errores del ajuste lineal de datos se usa la FUNCION “ESTIMACIÓN LINEAL”

**1 Paso:** Hacer Clic en una casilla y seleccionar la función ESTIMACION LINEAL. Botón fx (Insertar/Función/Estadísticas/ESTIMACIÓN LINEAL) Aceptar. Ver Figura 18.

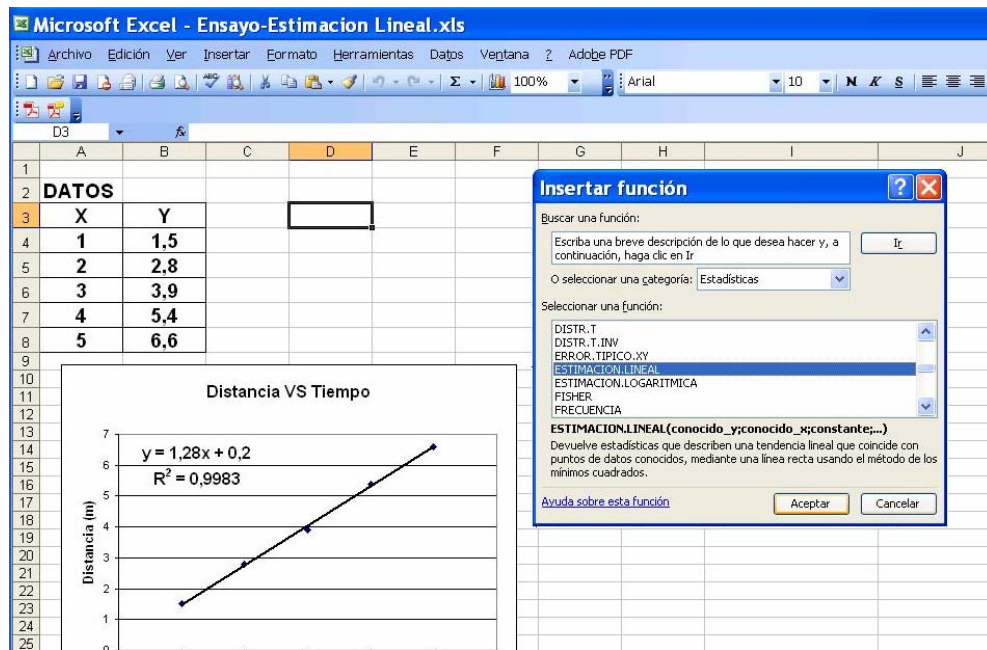


Figura 18

**2 Paso:** Seleccionar los valores en la tabla de datos de X y de Y. Colocar 1 en los otros dos valores (Constante y Estadística). Ver Figura 19.

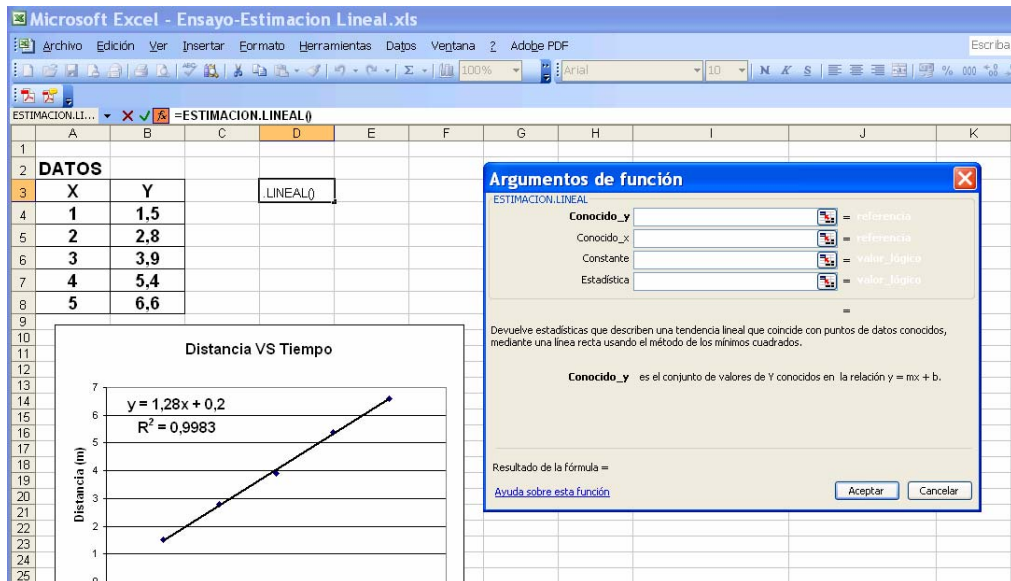


Figura 19

**3 Paso** La ESTIMACIÓN LINEAL coloca un dato en la casilla. Seleccionar un área alrededor de la casilla, tal que la casilla es el elemento (1,1) de una matriz 2 x 3. Una vez hecho esto, hacer Clic en la Barra de Fórmulas (Línea horizontal arriba) y a continuación presionar ctrl-shift-enter (Si no es así EXCEL no reconoce el arreglo como una matriz). Ver figura 20.

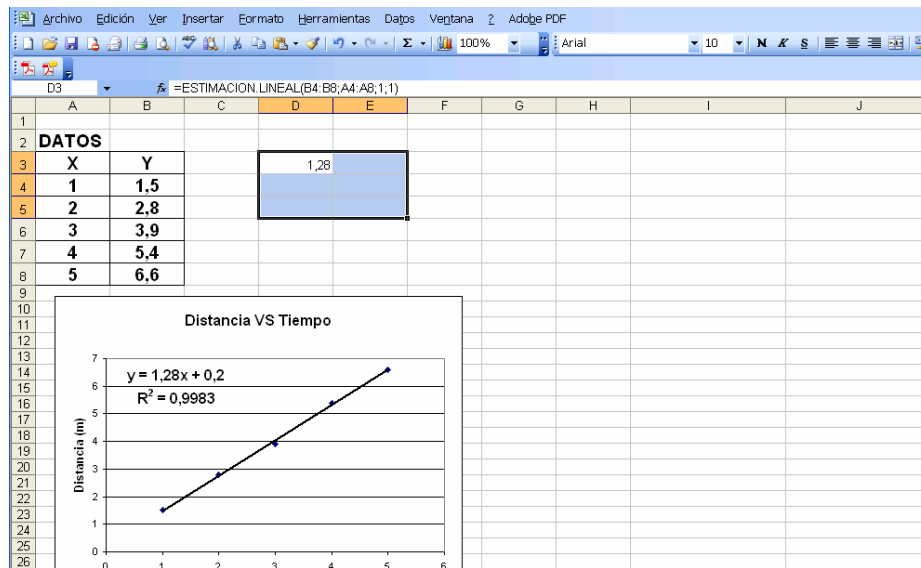
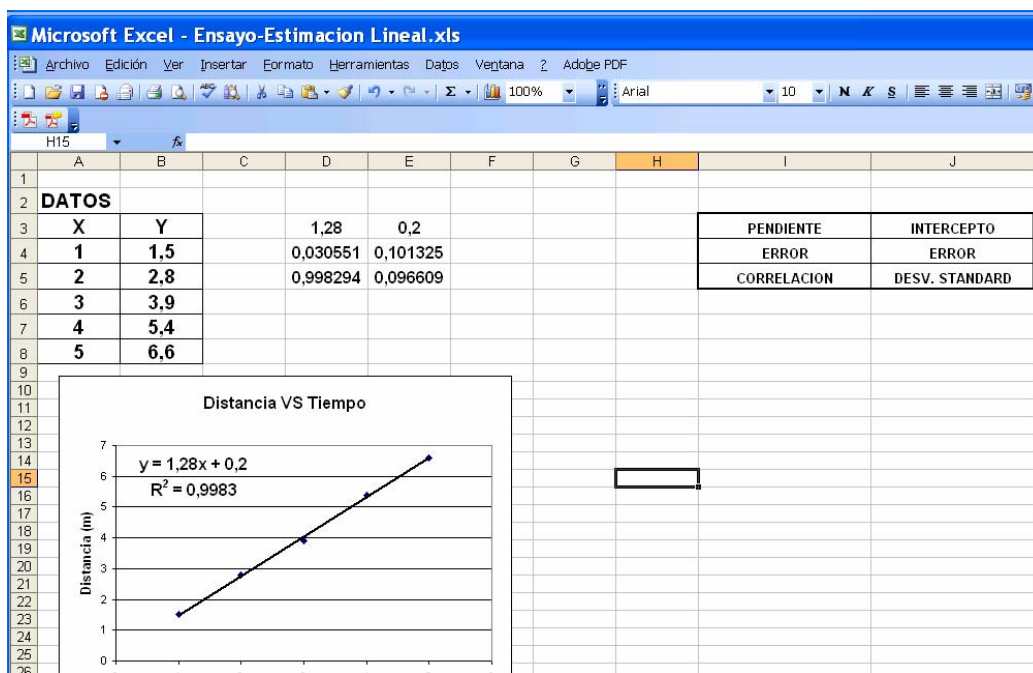


Figura 20

**Listo.** La matriz contiene los valores ajustados, sus errores y debajo el coeficiente de correlación y la desviación standard como indica la matriz a la derecha en la Figura 21.

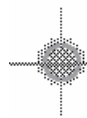


## EL LASER

Un Láser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) es un dispositivo que produce y amplifica luz por emisión estimulada de radiación. La luz Láser posee cuatro características importantes que la distinguen de la luz ordinaria.

- a) *Es unidireccional.*
- b) *Es monocromática.*
- c) *Es intensa.*
- d) *Es coherente.*

Por coherencia entendemos el transcurso coordinado de las ondas. En una fuente ordinaria de luz, como un bombillo, las emisiones de los átomos individuales no están coordinadas, resultando una luz incoherente. En cambio las ondas de luz láser son coherentes porque mantienen una diferencia de fase constante en el tiempo. La coherencia de las fuentes es una condición indispensable para poder observar el fenómeno de interferencia.



**LUZ LASER  
EVITE EXPONER DIRECTAMENTE SUS OJOS**

### Cuidados en los montajes con el láser de He-Ne

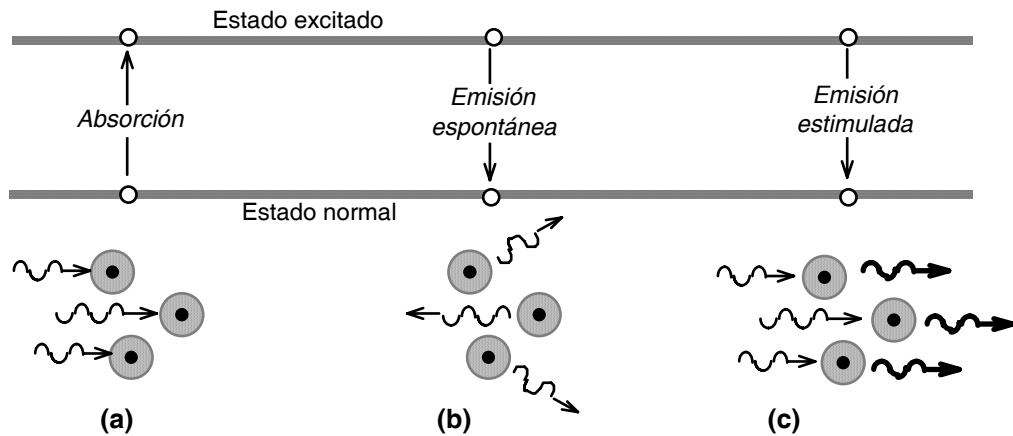
Bajo ninguna circunstancia se debe mirar directamente el haz del láser de He-Ne.

Evite que la reflexión del láser pueda llegar a los ojos de otros compañeros. Para esto **coloque el láser muy cerca de objetos que reflejan tales como redes de difracción, rendijas o lentes.** De esta manera los reflejos pegan directamente al láser y se evita que puedan afectar a sus compañeros.

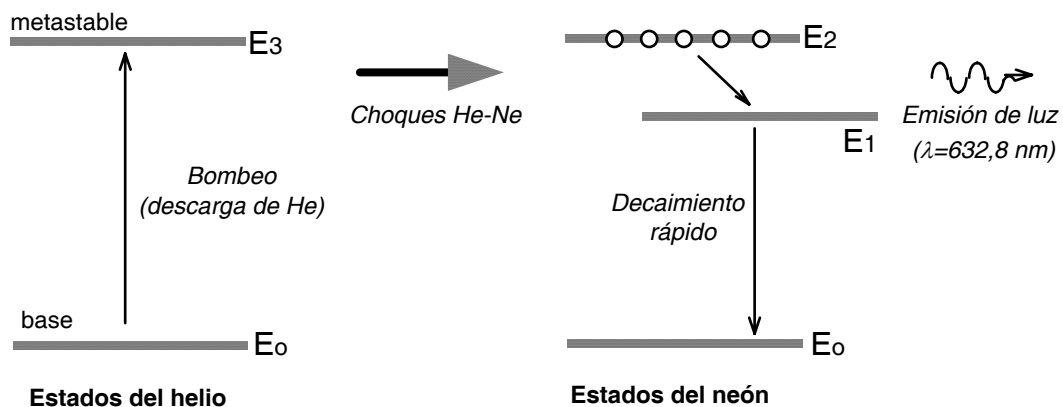
### ¿Cómo funciona el láser He-Ne ?

La acción de un láser se basa en la teoría cuántica. La *absorción* de un fotón por un átomo puede ocurrir si (y solo si) su energía ( $h\nu = hc/\lambda$ ) corresponde a la diferencia de energía entre un estado normal del átomo y un estado excitado disponible (figura a).

Una vez que el átomo está en un estado excitado, es posible que se efectúe en forma *espontánea* una transición al estado inferior con la emisión de un fotón (Figura b). El fotón emitido tiene la misma frecuencia que el fotón originalmente absorbido pero sale con direcciones y fases aleatorias. Existe un tercer proceso, propuesto por Einstein, llamado *emisión estimulada* (Figura c), en el cual, si un fotón con esta misma energía encuentra un átomo excitado, lo estimula a que efectúe una transición al estado de menor energía. En esta *emisión estimulada* el fotón emitido en la transición tiene la misma frecuencia y fase y sale en la misma dirección que el fotón original. Este es el mecanismo para producir luz coherente en un láser.



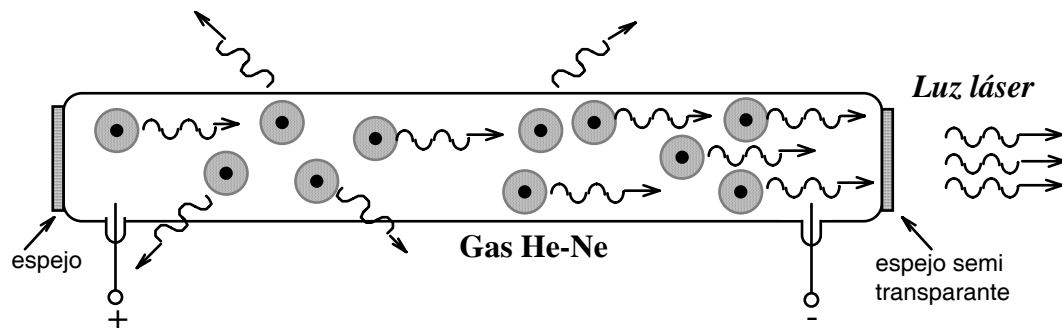
El láser He-Ne está constituido por una mezcla gaseosa de 85% de helio y 15% de neon que está sellada en un tubo de vidrio provisto de dos electrodos. El helio actúa como medio de "bombeo" y el neon como medio donde se produce la acción láser. Mediante una fuente de alto voltaje se crea una descarga de gas inducida eléctricamente en la mezcla He-Ne (como en los avisos luminosos). En esa descarga los átomos ionizados y electrones chocan ocasionalmente excitando a los átomos a varios estados energéticos. La figura siguiente muestra un diagrama (simplificado) de los niveles de energía y las transiciones relevantes en estos dos tipos de átomos.



Los átomos de Helio una vez excitados al nivel  $E_3$  tienen poca probabilidad de que decaer espontáneamente al estado base ( $E_0$ ) emitiendo un fotón. La razón es que el

estado  $E_3$  es metaestable, es decir, puede permanecer allí durante un tiempo largo. Sin embargo, como el nivel  $E_3$  del He ( $=20,61$  eV) está muy cercano al nivel del Ne ( $=20,66$  eV), la energía de excitación del He puede transferirse fácilmente durante los choques al Ne. De esta manera el nivel  $E_2$  del Ne puede volverse más altamente poblado que el nivel  $E_1$ . Cuando los átomos de Ne caen niveles energéticos inferiores, predomina la emisión estimulada del nivel  $E_2$  al nivel  $E_1$ , emitiendo luz roja de longitud de onda  $\lambda = hc/(E_2-E_1) = 632,8$  nm.

La mayoría de los fotones estimulados salen en todas direcciones. Sin embargo los fotones que salen paralelos al eje del tubo pueden reflejarse sucesivamente en los espejos colocados en los extremos del tubo. Estos fotones pueden provocar que ocurran a su vez otras *emisiones estimuladas*. De esta manera se provoca una especie de reacción en cadena en esa dirección. La longitud de la trayectoria óptica entre reflexiones sucesivas, debe ser un múltiplo de  $\lambda$  para que se produzca reforzamiento de la onda. Uno de los espejos está sólo parcialmente plateado y tiene menor reflectividad, lo cual permite que escape parte de la radiación en forma monocromática y bien colimada.



## Referencias

D. Halliday, R. Resnick y K. Krane, *Física*, Vol. 2, Cap.52, Ed Continental (1995)

T. Kallard, *Exploring Laser Light*, American Association of Physics Teachers (1977)