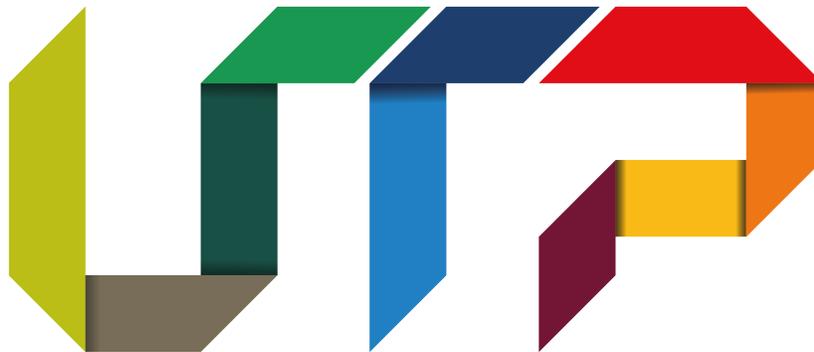


GUÍAS PARA PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE FÍSICA III CON AYUDAS MULTIMEDIA

(INGENIERÍAS Y TECNOLOGÍAS)



Universidad Tecnológica de Pereira

DEPARTAMENTO DE FÍSICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

PhD Beatriz Cruz Muñoz
PhD John Quiroga Hurtado

(Revisión y adecuación del texto)

ISBN 958-8065-25-9

Agosto 2020

INTRODUCCIÓN

El presente documento representa la adecuación y la actualización de las guías de laboratorio del curso de Física III sugerida para el desarrollo de las prácticas disponibles, considerando el estado actual de los equipos del laboratorio así como la posibilidad de orientar la realización de las prácticas de forma remota. Para este propósito el material presentado se complementa con una serie de vídeos en los cuales se explica cada uno de los pasos necesarios para el proceso de la toma de datos en cada una de las prácticas correspondientes.

Las prácticas a realizar están agrupadas en dos ciclos, en el primer ciclo se incluyen seis experimentos para el estudio y verificación experimental de las leyes fundamentales que rigen los procesos *oscilatorios y ondulatorios*. Por otro lado, el segundo ciclo involucra cinco de los llamados experimentos clásicos de finales del siglo XIX, que dieron origen al desarrollo de la teoría cuántica.

Los autores

Contenido

1	Péndulo Físico	4
1.1	Objetivos	4
1.2	Preinforme	4
1.3	Fundamento Teórico	4
1.3.1	Péndulo equivalente	7
1.3.2	Propiedad de reversibilidad	7
1.4	Materiales	11
1.5	Precauciones	12
1.6	Procedimiento	12
1.7	Análisis	13
2	Péndulos Acoplados	15
2.1	Objetivos	15
2.2	Preinforme	15
2.3	Fundamento Teórico	15
2.4	Materiales	17
2.5	Precauciones	18
2.6	Procedimiento	18
2.7	Análisis	21
3	Ondas estacionarias en una cuerda tensa	22
3.1	Objetivos	22
3.2	Preinforme	22
3.3	Fundamento Teórico	22
3.4	Materiales	25
3.5	Precauciones	26
3.6	Procedimiento	26
3.7	Análisis	27
4	Ondas estacionarias en una columna de aire	29
4.1	Objetivos	29
4.2	Preinforme	29

4.3	Fundamento Teórico	29
4.4	Materiales	32
4.5	Precauciones	32
4.6	Procedimiento	32
4.6.1	Frecuencias de resonancia de un tubo abierto	32
4.6.2	Frecuencias de resonancia de un tubo cerrado	34
4.7	Análisis	35
5	Óptica Geométrica	36
5.1	Objetivos	36
5.2	Preinforme	36
5.3	Fundamento Teórico	36
5.3.1	Ley de propagación rectilínea de la luz	37
5.3.2	Ley de reflexión de la luz	37
5.3.3	Ley de refracción de la luz	38
5.3.4	Ley de independencia de los haces luminosos	39
5.4	Recomendaciones	40
5.5	Materiales	40
5.6	Procedimiento	40
5.6.1	Ley de Snell	40
5.6.2	Óptica Geométrica	42
6	Difracción de la luz	45
6.1	Objetivos	45
6.2	Preinforme	45
6.3	Materiales	45
6.4	Fundamento Teórico	46
6.4.1	Difracción de Fraunhofer por una rendija rectangular	47
6.4.2	Difracción de Fraunhofer por una rendija doble	49
6.4.3	Difracción por múltiples rendijas - Rejillas	49
6.5	Procedimiento	50
6.5.1	Difracción por una rendija rectangular	50
6.5.2	Difracción por rendija doble	52
6.5.3	Múltiples rendijas de Difracción	53
6.6	Análisis	53

CICLO I: OSCILACIONES Y ONDAS



DEPARTAMENTO DE FÍSICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

Laboratorio 1

Péndulo Físico

1.1 Objetivos

1. Estudiar el comportamiento del péndulo físico.
2. Determinar la aceleración de la gravedad.

1.2 Preinforme

1. Exprese y explique el teorema de ejes paralelos.
2. ¿A qué se denomina radio de giro? Expréselo en términos del momento de inercia para un eje que pase por el centro de masa (CM).

1.3 Fundamento Teórico

Un péndulo físico es un cuerpo rígido que puede girar libremente alrededor de un eje tal como se muestra en la Figura (1.1). Cuando el cuerpo se separa de la posición de equilibrio y se suelta, presentará un movimiento oscilatorio. Empleando la ecuación de la dinámica rotacional:

$$\vec{\tau}_A = I_A \vec{\alpha}, \quad (1.1)$$

se puede hallar la ecuación de movimiento, donde:

- τ_A : Momento o torque alrededor de A (Análogo rotacional de la fuerza).
 I_A : Momento de inercia del cuerpo alrededor de A (Análogo de la masa).
 α : Aceleración angular del cuerpo (Análogo de la aceleración lineal).

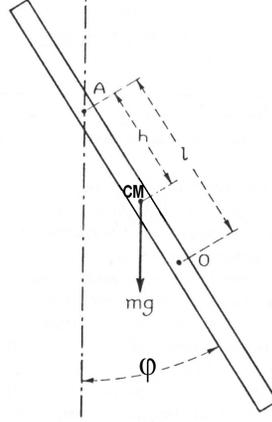


Figura 1.1: Diagrama de fuerzas para el péndulo físico.

El peso del cuerpo $M\vec{g}$, aplicado al centro de masa, produce un momento respecto a un eje de rotación que pasa por el punto A , dado por:

$$\vec{\tau}_A = \vec{h} \times M\vec{g} \quad (1.2)$$

Donde:

M : Masa total del cuerpo rígido.

h : Distancia entre el punto de suspensión A y el centro de masa.

Utilizando la definición de producto vectorial y tomando como positivo el movimiento de rotación en sentido contrario al de las manecillas del reloj, se obtiene:

$$\tau_a = -Mgh \sin\varphi,$$

siendo φ el ángulo entre los vectores \vec{h} y $M\vec{g}$.

De la definición de aceleración angular tenemos:

$$\alpha = \ddot{\varphi} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$$

Entonces, de (1.1) y (1.2):

$$\alpha = \ddot{\varphi} = -\frac{Mgh \sin\varphi}{I_A}.$$

Para pequeñas oscilaciones se asume válida la aproximación:

$$\text{sen}\varphi \cong \varphi$$

con lo cual:

$$\ddot{\varphi} + \frac{Mgh}{I_A}\varphi = 0, \quad (1.3)$$

definiendo:

$$\omega^2 \equiv \frac{Mgh}{I_A}$$

se obtiene:

$$\ddot{\varphi} + \omega^2\varphi = 0. \quad (1.4)$$

La ecuación (1.4), posee la misma estructura de la ecuación del oscilador armónico, donde ω es la frecuencia angular de oscilación.

Considerando que:

$$\omega = \frac{2\pi}{T},$$

el período de oscilación será:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I_A}{Mgh}}. \quad (1.5)$$

De acuerdo con el teorema de ejes paralelos, asumiendo que I_0 es el momento de inercia respecto de un eje que pasa por el centro de masa (CM), el momento de inercia de la barra, respecto del eje que pasa por el punto A, es:

$$I_A = I_0 + Mh^2.$$

Por definición $I_0 = MK_0^2$, con lo cual:

$$I_A = MK_0^2 + Mh^2,$$

siendo K_0 el radio de giro.

Sustituyendo I_A en la ecuación (1.5) se obtiene finalmente, la siguiente expresión para el período de oscilación del péndulo físico:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{K_0^2 + h^2}{gh}}. \quad (1.6)$$

Esta ecuación expresa el período en términos de la geometría del cuerpo. Ésta muestra que T es independiente de la masa, dependiendo únicamente de la distribución de masa medida por K_0 y de la localización del eje de suspensión (especificado por h). Ya que K_0 para cualquier cuerpo rígido es una constante, el período T de cualquier péndulo físico es función sólo de h .

1.3.1 Péndulo equivalente

Recordando la ecuación del período del péndulo simple:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}, \quad (1.7)$$

al compararla con la ecuación (1.6), se observa que el período de un péndulo físico suspendido de un eje a una distancia h del centro de gravedad, es igual al período de un péndulo simple de longitud dada por:

$$L = \frac{K_0^2 + h^2}{h} = h + \frac{K_0^2}{h}. \quad (1.8)$$

El péndulo simple cuyo período es el mismo que el dado por un péndulo físico, es llamado **péndulo simple equivalente**.

1.3.2 Propiedad de reversibilidad

Es conveniente especificar la localización del eje de suspensión que pasa por el punto A, en términos de la distancia desde el extremo superior de la barra, en lugar de su distancia h medida desde el centro de masa (CM).

Si las distancias s_1 , s_2 y D (Figura 1.2) son medidas desde el extremo superior, la distancia h_1 debe ser considerada negativa ya que está medida desde el CM. Así, si D es la distancia fija desde extremo superior de la barra al CM,

$$\begin{aligned} s_1 &= D - h_1 \\ s_2 &= D + h_2 \end{aligned}$$

y en general:

$$s_i = D + h_i, \quad i = 1, 2, \dots$$

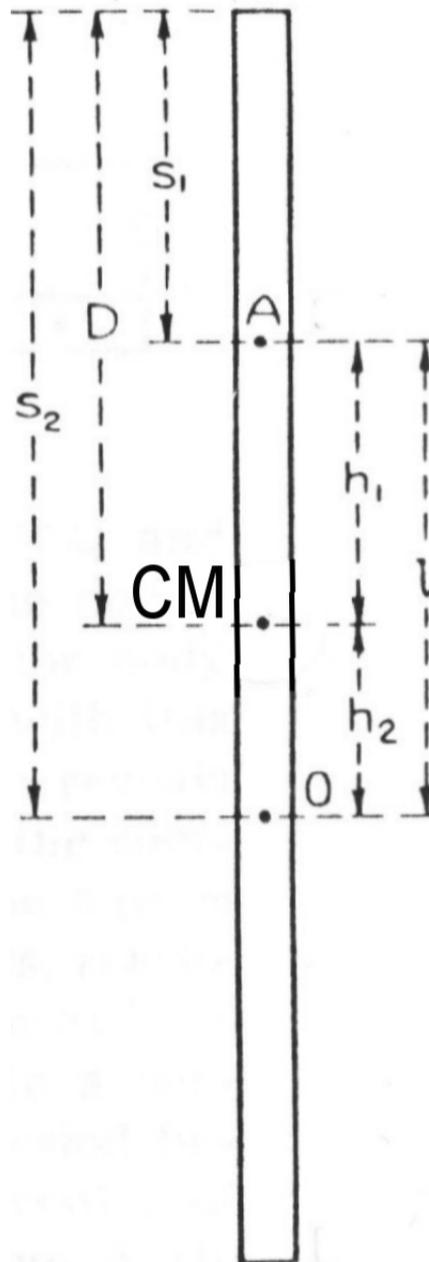


Figura 1.2: Distancias a medir.

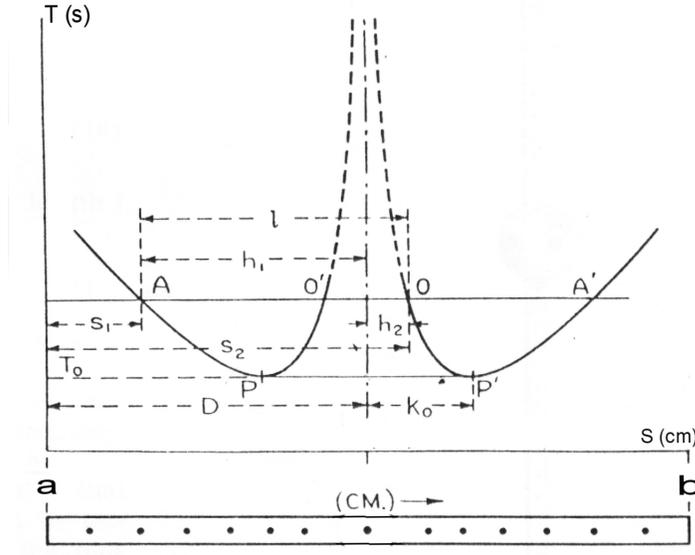


Figura 1.3: Período en función de la distancia al centro de masa (CM).

Sustituyendo esta relación en la ecuación (1.6) se obtiene:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{K_0^2 + (s_i - D_i)^2}{g(s_i - D_i)}}. \quad (1.9)$$

La relación entre T y s_i expresada por la ecuación (1.9) puede mostrarse mejor gráficamente.

Cuando T es trazada como una función de s , un par de curvas idénticas APQ y $A'P'Q'$ son obtenidas como se ilustra en la figura (1.3). La porción punteada de la curva representa la extrapolación sobre una parte del cuerpo donde es difícil obtener experimentalmente datos con este péndulo en particular. El análisis de estas curvas revelan varias propiedades interesantes y observables del péndulo físico. Empezando en el extremo superior **a**, cuando el eje es desplazado desde **a** hacia **b**, el período disminuye, encontrándose un valor mínimo en P , después del cual se incrementa cuando s se aproxima al CM. En la vecindad de este CM, la curva que representa el período como función del eje de suspensión, crece indefinidamente teniendo como asíntota una línea vertical que pasa por el CM. Si se continúa desplazando el eje, al pasar al otro lado del CM, se observa un comportamiento decreciente del período, alcanzando nuevamente un mínimo en el punto P' , es importante resaltar que el comportamiento del período en esta región es simétrico respecto de los valores del mismo en el tramo anterior de la gráfica (ver figura 1.3).

Una línea horizontal AA' correspondiente a valores escogidos del período, intersecta la gráfica en cuatro puntos indicando que hay cuatro posiciones del eje, dos en cada lado del C.M, para los cuales el período es el mismo. Estas posiciones son simétricamente localizadas con respecto del CM Hay por lo tanto dos valores numéricos de h para los cuales el período es el mismo, representados por h_1 y h_2 (Figuras 1.2 y 1.3).

De esta manera, para cualquier eje de suspensión escogido A , existe un punto conjugado O del lado opuesto del CM tal que los períodos de oscilación respecto de los ejes paralelos que pasan por los puntos A y O son iguales.

El punto O es llamado *centro de las oscilaciones* respecto del eje particular de suspensión que pasa por el punto A . Consecuentemente, si el centro de oscilaciones para cualquier péndulo físico es localizado, el péndulo puede ser invertido y soportado de O sin alterar su período. Esta llamada **reversibilidad** es una de las propiedades únicas del péndulo físico y ha sido la base de un método muy preciso para medir la aceleración gravitacional g .

Puede mostrarse que la distancia entre A y O es igual a l , la longitud del péndulo simple equivalente.

Alrededor de A :

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{g} \left(\frac{K_0^2 + h_1^2}{h_1} \right)$$

y alrededor de O :

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{g} \left(\frac{K_0^2 + h_2^2}{h_2} \right).$$

Igualando estas expresiones:

$$K_0^2 = h_1 h_2,$$

por lo tanto:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{g} (h_1 + h_2) \tag{1.10}$$

ó

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{h_1 + h_2}{g}} \tag{1.11}$$

Comparando con la expresión para el péndulo simple, se obtiene para l (ver figura 1.2):

$$l = h_1 + h_2, \quad (1.12)$$

esta representa la longitud de un péndulo simple equivalente \overline{AO} .

A' y O' son un segundo par de puntos conjugados simétricamente localizados respecto de A y O correspondientemente, por lo tanto tienen un mismo valor numérico de h_1 y h_2 . Más consideraciones de la Figura (1.3) revela el hecho que el período de vibración para un cuerpo dado no puede ser menor que un cierto valor mínimo T_0 para el cual los cuatro puntos de igual período se reducen a dos, P y P' , en tanto que h_1 , llega a ser numéricamente igual a h_2 . El valor mínimo de h_0 correspondiente al mínimo período T_0 , puede ser deducido por solución de las ecuaciones (1.10) y (1.11), las cuales producen

$$K_0^2 = h_1 h_2$$

y colocando

$$h_0 = h_1 = h_2,$$

se obtiene

$$K_0 = h_0.$$

Reemplazando esto en la ecuación (1.8) se obtiene:

$$l_0 = 2K_0.$$

Así, el péndulo simple más corto, para el cual el péndulo físico puede ser equivalente, tiene una longitud l_0 igual al doble del radio de giro del cuerpo alrededor de un eje paralelo que pasa a través de C.M. Esto se indica en la figura (1.3) por la línea PP' . Inspeccionando la figura (1.3), esta muestra además que de los dos valores de h diferentes del mínimo, uno es mayor que K_0 y el otro menor.

De lo anterior, es evidente que si se encuentran dos puntos asimétricos A y O, tales que el período de vibración sea idéntico, la longitud del péndulo simple equivalente es la distancia entre los dos puntos, en consecuencia, no es necesario localizar el centro de gravedad C.M. Así, haciendo uso de la propiedad de reversibilidad del péndulo físico, se obtiene una simplificación similar a la del péndulo simple y la determinación experimental se reduce a una medida de longitud y una medida de período.

1.4 Materiales

- Equipo de péndulo físico: Soportes, varilla y cronómetro.
- Nivel de burbuja.
- Cinta métrica graduada en mm.

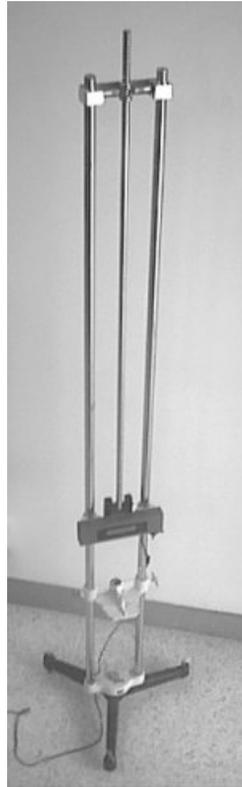


Figura 1.4: Fotografía del equipo utilizado.

1.5 Precauciones

- Familiarizarse con el equipo.
- Cerciórese que el péndulo puede oscilar libremente y que el cronómetro esté funcionando.
- Tenga en cuenta la aproximación $\text{sen}\varphi \approx \varphi$ para su trabajo.
- Recuerde nivelar el equipo arriba y abajo.

1.6 Procedimiento

El péndulo físico utilizado para esta práctica está constituido por una varilla metálica en forma cilíndrica delgada que posee una serie de marcas dispuestas cada cinco centímetros aproximadamente entre sus centros, con un sistema de suspensión adecuado para que la varilla pueda oscilar libremente alrededor de un eje horizontal (eje de suspensión), con rodamientos para minimizar la fricción (ver Fig.1.4)

1. Determine el centro de masa (CM) de la varilla y elija un extremo para determinar la primera posición del eje de suspensión.
2. Mida la longitud h desde el centro de masa (CM) al eje de suspensión.
3. Suspenda el péndulo de la primera marca más cercana al extremo elegido de la varilla y asegúrese que oscila libremente en un plano vertical.
4. Para una amplitud dada, mida 10 veces el período de las oscilaciones. Determine el período promedio para la altura h seleccionada.
5. Repita el procedimiento para cada una de las marcas hasta llegar al CM
6. Invierta la varilla y continúe realizando las mediciones hasta llegar al extremo opuesto de la varilla.
7. Mida la masa de la varilla.

En el siguiente vídeo se observa la forma como se toman los datos, siguiendo las instrucciones del procedimiento.



[Hacer click para ver el vídeo](#)

1.7 Análisis

1. Con los datos obtenidos construya una gráfica del período T en función de la distancia al centro de masa (CM), h . Considere el origen de coordenadas como el centro de masa. Se recomienda usar una hoja de cálculo. Ajuste las escalas de manera que sea más evidente la forma de la curva.
2. A partir del gráfico obtenido determine si existe algún tipo de simetría y explique cuál es su naturaleza.

3. Teniendo en cuenta la gráfica obtenida, determine el comportamiento del período, en la medida que h se acerca al valor $h = 0$?. Explique este comportamiento.
4. A partir de la gráfica, determine el radio de giro K_0 , así como el período mínimo con el cual este péndulo puede oscilar.
5. Calcule I_0 , el momento de inercia rotacional alrededor del centro de masa.
6. Trace una recta paralela al eje horizontal de la gráfica para un período mayor al mínimo T_0 que corte cada una de las ramas de la curva correspondiente, en dos puntos. Halle las parejas de cortes (h_1, h_2) y (h'_1, h'_2) . Con el valor de T , determinado por esta recta y la longitud L correspondiente al péndulo simple equivalente dado, definida por $L = h_1 + h_2$, así como $L = h'_1 + h'_2$, calcule el valor de la gravedad, usando la ecuación (1.7). Calcule el error porcentual respecto del valor aceptado.
7. Determine la incertidumbre del valor experimental de la gravedad, considerando que ésta se calcula en función de mediciones directas del período de las oscilaciones y de las distancias del eje suspensión hasta el centro de masa.

Laboratorio 2

Péndulos Acoplados

2.1 Objetivos

1. Identificar y determinar las frecuencias propias de oscilación para un sistema de dos grados de libertad.
2. Determinar el valor de aceleración de la gravedad.

2.2 Preinforme

1. ¿A qué se denomina grado de libertad?
2. ¿A qué se denomina modo propio de oscilación?
3. Haga las consideraciones físicas necesarias para deducir las ecuaciones (2.1) y (2.2).
4. ¿En qué consiste el método dinámico para determinar la constante elástica del resorte ? ($\omega^2 = \frac{k}{m}$).

2.3 Fundamento Teórico

En esta práctica de laboratorio se estudia el comportamiento de un sistema oscilatorio formado por dos péndulos simples idénticos, fijos a un mismo soporte con un resorte de constante elástica k colocado entre estos, conocido con el nombre de **péndulos acoplados**. Figura 2.1.

La inclusión del resorte entre los péndulos hace que sus movimientos no sean independientes. El movimiento de uno de estos influye en el movimiento del otro y viceversa dando como resultado un movimiento que se conoce como **oscilaciones**

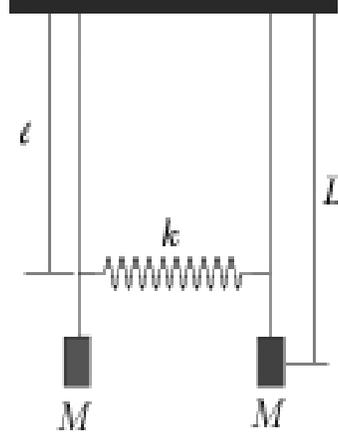


Figura 2.1: Péndulos acoplados en reposo.

acopladas. Dado que para describir el movimiento de cada uno de los péndulos son necesarias dos funciones de posición angular con respecto al tiempo: $\theta_1(t)$ y $\theta_2(t)$, se dice que el sistema posee dos grados de libertad.

La dinámica asociada al movimiento de cada uno de los péndulos puede resumirse de la siguiente manera: cuando la masa se separa de la posición de equilibrio una cierta cantidad angular, aparece sobre esta un torque restaurador τ que tiende a llevarla de nuevo a dicha posición, causándole una aceleración angular $\vec{\alpha}$, la cual se relaciona con dicho torque a través de la expresión:

$$\vec{\tau} = I\vec{\alpha}$$

I : es el momento de inercia de la masa M respecto al eje de rotación.

De la definición de I y de α , la anterior ecuación se escribe como:

$$\vec{\tau} = ML^2\vec{\theta}$$

Utilizando esta ecuación y la definición de $\vec{\tau}$, se encuentra que para el péndulo cuyo desplazamiento es θ_1 se tiene la siguiente ecuación de movimiento:

$$ML^2\ddot{\theta}_1 = -MgL\text{sen}(\theta_1) + k\ell^2\text{sen}(\theta_2 - \theta_1), \quad (2.1)$$

y para el otro

$$ML^2\ddot{\theta}_2 = -MgL\text{sen}(\theta_2) - k\ell^2\text{sen}(\theta_2 - \theta_1). \quad (2.2)$$

Si los desplazamientos θ_1 y θ_2 son pequeños, la aproximación $\text{sen}\theta \simeq \theta$ será válida, con lo cual las expresiones (2.1) y (2.2) se reescriben como:

$$ML^2\ddot{\theta}_1 = -MgL\theta_1 + k\ell^2(\theta_2 - \theta_1), \quad (2.3)$$

$$ML^2\ddot{\theta}_2 = -MgL\theta_2 - k\ell^2(\theta_2 - \theta_1). \quad (2.4)$$

Dado que las anteriores ecuaciones se encuentran acopladas, se sigue el siguiente procedimiento de desacople:

Al sumar y restar las ecuaciones (2.3) y (2.4) se obtiene:

$$ML^2\ddot{\Theta}_1 = -MgL\Theta_1, \quad (2.5)$$

$$ML^2\ddot{\Theta}_2 = -(MgL + 2k\ell^2)\Theta_2. \quad (2.6)$$

Donde: $\Theta_1 = \theta_1 + \theta_2$ y $\Theta_2 = \theta_1 - \theta_2$.

Introduciendo en las ecuaciones (2.5) y (2.6) la siguiente notación,

$$\omega_1^2 = \frac{g}{L}, \quad (2.7)$$

$$\omega_2^2 = \frac{g}{L} + 2\epsilon^2 \frac{k}{M}, \quad (2.8)$$

siendo $\epsilon^2 = \frac{\ell^2}{L^2}$, se obtienen las ecuaciones desacopladas, de dos osciladores armónicos, con frecuencias ω_1 y ω_2 respectivamente:

$$\begin{aligned} \ddot{\Theta}_1 + \omega_1^2\Theta_1 &= 0, \\ \ddot{\Theta}_2 + \omega_2^2\Theta_2 &= 0. \end{aligned}$$

Las frecuencias definidas por (2.7) y (2.8) corresponden a los modos propios de oscilación, en fase ω_1 y en contrafase ω_2 , del sistema de péndulos acoplados.

2.4 Materiales

- Equipo de péndulos acoplados: soportes y resorte de acople.
- CASSY LAB. con módulo de adquisición de datos
- Cables de conexión



Figura 2.2: Montaje de péndulos acoplados.

2.5 Precauciones

- El resorte no debe quedar deformado al conectarlo entre las varillas que sostienen las masas y debe estar a nivel.
- Las oscilaciones deben ser pequeñas: ligeros desplazamientos desde sus posiciones de equilibrio.

2.6 Procedimiento

1. Considere el valor $k = 2,9754N/m$ para la constante elástica del resorte a utilizar.
2. Monte el arreglo ilustrado en la figura 2.2. El resorte debe ubicarse lo más horizontal posible y en la posición más baja de las varillas.
3. Determine la relación $\epsilon = \frac{\ell}{L}$. Donde ℓ es la distancia entre el punto de suspensión y el punto de ubicación del resorte.
4. Encienda el computador y abra la aplicación CASSY LAB. Deberá ver el cuadro de la figura 2.3:

Presione el botón izquierdo sobre el dibujo del módulo de adquisición de

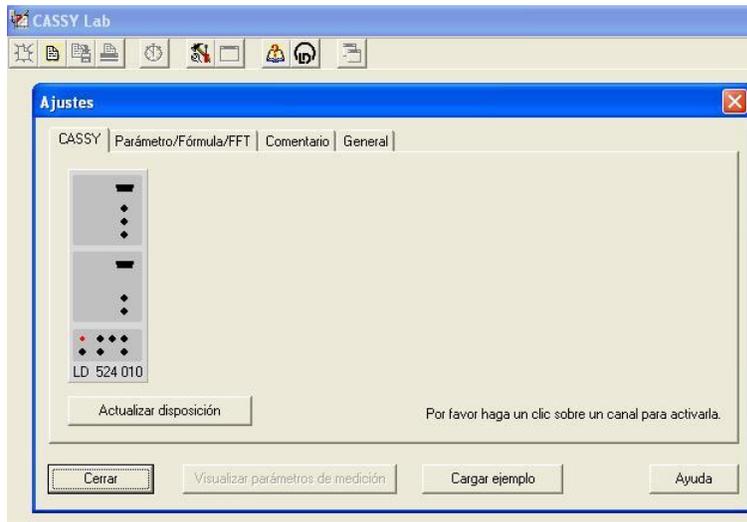


Figura 2.3: Cuadro inicial.

datos. Deberán identificarse las dos entradas de voltaje. Escoja la máxima sensibilidad posible para la medida de voltaje. A continuación deberá observar el programa completo con las ventanas de tensiones U_1 y U_2 y la ventana de parámetros de medición.



Figura 2.4: Péndulos acoplados oscilando en fase (izquierda) y contrafase (derecha).

En la ventana de parámetros de medición escoja un tiempo de 5 s un intervalo de 1 ms y un registro automático de datos. En este momento está listo para comenzar la toma de datos, la cual se inicia al presionar el botón con el cronómetro y se termina presionando el mismo botón o hasta que el tiempo de 5 s se agote. Tómese su tiempo para familiarizarse con los demás iconos y funciones del programa. En caso necesario presione el icono de ayuda (libro con interrogante).

5. Para la misma posición haga oscilar los péndulos en fase como se muestra en la figura 2.4. Inicie la toma de datos e inmediatamente observará la aparición de un gráfico en la pantalla principal (Figura 2.5). De ser necesario ajuste la

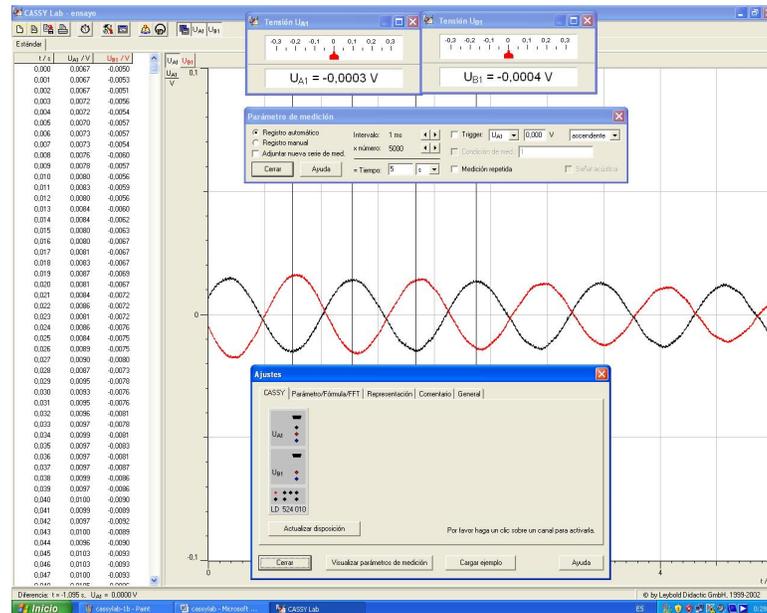


Figura 2.5: Ventana principal del programa

escala vertical para observar mejor la variación de voltaje. Mida el período de la oscilación escogiendo dos máximos del gráfico y marcándolos con la herramienta **Pegar marcas**, que aparece al hacer click con el botón derecho del ratón sobre el gráfico. Esta herramienta permite dibujar dos líneas verticales y luego medir la diferencia temporal entre éstas. Al escoger la opción medir diferencias debe hacer click en cada línea vertical y el programa dibujará una línea horizontal. En la parte inferior izquierda de la pantalla aparecerá el valor de la diferencia en tiempo entre las dos líneas escogidas. Este es su valor de período. Repita este procedimiento al menos tres veces con puntos diferentes y obtenga un valor promedio para el período.

6. Para la misma posición haga oscilar los péndulos en contrafase como se muestra en la figura 2.4. Inicie la toma de datos y determine el período.
7. Repita los pasos 4 y 5 para otras cuatro posiciones de acople entre el resorte y los péndulos.
8. En el siguiente vídeo se observa la forma como se toman los datos, siguiendo las instrucciones del procedimiento.



[Hacer click para ver el vídeo](#)

2.7 Análisis

1. Con los datos experimentales hallados en los numerales 4, 5 y 6 obtenga ω_1 y ω_2 .
2. Con los valores obtenidos, construya una gráfica de ω_2^2 vs ϵ^2 y determine la ecuación de la línea de tendencia correspondiente.
3. Comparando la ecuación obtenida en el ítem anterior con la ecuación (2.8) del marco teórico halle los valores experimentales de g y k . Calcule además, la desviación porcentual respecto de los valores teóricos de estas magnitudes físicas.
4. Determine las incertidumbres en la medición experimental de g y k . Considere que estos valores han sido estimados mediante la recta de interpolación lineal en función de los parámetros de dicha recta, a saber, pendiente e intercepto. Por esta razón, para el cálculo de esta incertidumbre se debe tener en cuenta la incertidumbre asociada a la estimación de los parámetros de la recta de interpolación en el método de mínimos cuadrados. En el documento que puede revisar en el siguiente link se ilustra el método para el cálculo de estas incertidumbres. [Hacer click para ver el documento](#)

Laboratorio 3

Ondas estacionarias en una cuerda tensa

3.1 Objetivos

- (a) Determinar los modos normales de vibración de una cuerda fija en ambos extremos.
- (b) Verificar experimentalmente la dependencia de las frecuencias normales de oscilación de la cuerda como función de los parámetros involucrados: tensión, longitud y densidad.
- (c) Encontrar la densidad de la cuerda utilizada.

3.2 Preinforme

- (a) ¿A qué se denomina resonancia? Explique.
- (b) ¿Cuál es la diferencia entre ondas estacionarias y ondas viajeras?
- (c) Mediante diagramas explique los modos de resonancia de una cuerda fija en ambos extremos.

3.3 Fundamento Teórico

Considérese una cuerda de longitud L y densidad lineal de masa μ , sujeta en los extremos $x = 0$ y $x = L$. La cuerda se hace oscilar en un punto por medio de un vibrador conectado a un generador de ondas senoidales. En estas condiciones, el sistema se constituye en un oscilador forzado. Un

análisis de las ondas incidentes y reflejadas que se forman en la cuerda ¹ lleva a la siguiente función de onda como solución de la ecuación diferencial unidimensional de onda:

$$\psi(x, t) = (A \operatorname{sen} kx + B \cos kx) \operatorname{sen} \omega t. \quad (3.1)$$

La función $\psi(x, t)$ no describe una onda viajera ya que x y t no están involucrados en el argumento de esta función en la forma $(x \pm vt)$. Esto da como resultado una amplitud que tiene la característica de ser fija para cada punto particular de la cuerda, pero variable de un punto a otro a lo largo de la misma. La expresión para la amplitud será entonces:

$$\phi(x, t) = (A \operatorname{sen} kx + B \cos kx). \quad (3.2)$$

Las constantes A y B se determinan con las condiciones iniciales.

En consecuencia, la expresión:

$$\psi(x, t) = \phi(x) \operatorname{sen} \omega t$$

indica que cada punto de la cuerda tiene un movimiento armónico transversal de frecuencia ω .

Cuando la cuerda esté en resonancia con el agente externo que produce el movimiento, se presentarán los distintos modos propios de oscilación y los desplazamientos transversales tendrán su máxima amplitud.

Para encontrar las frecuencias f_n correspondientes a los modos propios de oscilación se utilizan las siguientes condiciones de frontera:

- $\psi(0, t) = 0$,
- $\psi(L, t) = 0$.

De la primera condición de frontera se obtiene:

$$[A \operatorname{sen} k(0) + B \cos k(0)] \operatorname{sen} \omega t = B \operatorname{sen} \omega t = 0.$$

Por lo tanto $B = 0$ y la ecuación (3.1) queda de la siguiente manera:

$$\psi(x, t) = A \operatorname{sen} kx \operatorname{sen} \omega t.$$

¹ver FÍSICA volumen II: campos y ondas Alonso-Finn, sección 22.5

24LABORATORIO 3. ONDAS ESTACIONARIAS EN UNA CUERDA TENSA

De la segunda condición de frontera:

$$A \operatorname{sen} kL \operatorname{sen} \omega t = 0.$$

En esta ecuación A y $\operatorname{sen} \omega t$ deben ser diferentes de cero. Por tanto:

$$\operatorname{sen} kL = 0.$$

Lo cual es válido para $kL = n\pi$ con $n = 1, 2, 3, \dots$

Utilizando las expresiones del movimiento ondulatorio $k = 2\frac{\pi}{\lambda}$ y $v = \lambda f$, donde k y v son el número de onda y la velocidad de propagación de la onda respectivamente, se obtiene la siguiente expresión para las frecuencias correspondientes a los modos propios de oscilación de la cuerda:

$$f_n = \frac{nv}{2L}.$$

De la dinámica asociada a las ondas transversales en una cuerda, la velocidad de propagación de ellas a lo largo de la misma está dada por:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}.$$

Siendo T la tensión en la cuerda. Finalmente, la expresión para las frecuencias propias obtiene la forma:

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}, \quad (3.3)$$

donde $n = 1$ corresponde al modo fundamental:

$$f_1 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

y $n = 2$ corresponde al segundo armónico, $n = 3$ al tercero y así sucesivamente, siendo cada uno de estos, múltiplos de la frecuencia fundamental en la forma: $f_2 = 2f_1$, $f_3 = 3f_1 \dots$ y así sucesivamente.

La figura 3.1 es una representación gráfica de la distribución de las frecuencias normales de la cuerda hasta el segundo armónico.

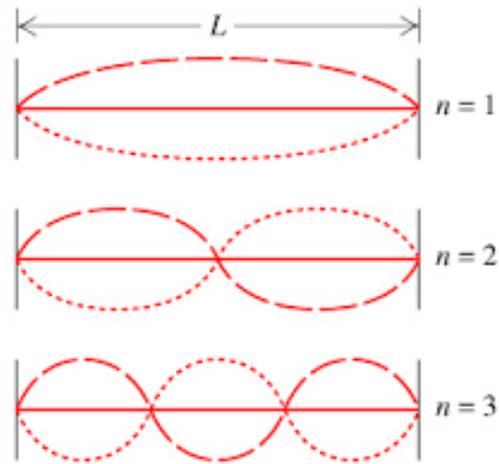


Figura 3.1: Ondas estacionarias en la cuerda.

3.4 Materiales

- Sensor de fuerza con su cable (Figura 3.2a).
- Vibrador mecánico (Figura 3.2b).
- Generador de señales.
- Xplorer GLX con su fuente de alimentación (Figura 3.3).
- Cuerda, portapesas y 6 masas
- Cinta métrica



(a) Sensor de fuerza



(b) Vibrador mecánico

Figura 3.2: Imgenes del sensor de fuerza y vibrador mecánico

26 LABORATORIO 3. ONDAS ESTACIONARIAS EN UNA CUERDA TENSA



Figura 3.3: Xplorer GLX

3.5 Precauciones

- Utilice una señal senosoidal y coloque el extremo del vibrador lo más cerca posible a uno de los extremos de la cuerda.
- Utilice el frecuenciómetro con una sensibilidad de 0.2, "Gate time" en 1 s y la escala en 100 Hz.
- Cerciórese que la longitud de la cuerda sea la máxima posible.
- Observe que la cuerda esté en posición horizontal y sus extremos fijos se encuentren a la misma distancia del borde de la mesa.

3.6 Procedimiento

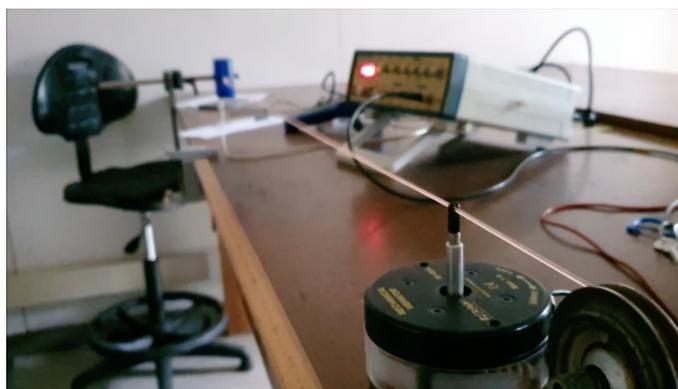


Figura 3.4: Montaje experimental.

- (a) Mida la longitud total de la cuerda y su masa.
- (b) Monte el equipo como se sugiere en la figura 3.4.
- (c) Fije la tensión a un valor, mida la longitud entre los extremos fijos L y con el generador de señales trate de encontrar hasta 7 armónicos. Utilizando el frecuencímetro mida las frecuencias para cada uno de ellos. Empiece con el fundamental.
- (d) Sin cambiar de cuerda, en el modo fundamental, o en el segundo armónico, mantenga constante la longitud L y mida la frecuencia para cinco valores distintos de la tensión T .
- (e) Ahora sin cambiar de cuerda, en el modo fundamental, o en el segundo armónico, mantenga constante la tensión y mida la frecuencia para cinco valores distintos de la longitud.
- (f) Procese los datos correspondientes a cada numeral en una tabla de datos.

En el siguiente vídeo se observa la forma como se toman los datos, siguiendo las instrucciones del procedimiento.



[Hacer click para ver el vídeo](#)

3.7 Análisis

- (a) Con los datos del numeral 3 del procedimiento:
 - Construya una gráfica de frecuencia f en función del número de vientres n . Qué clase de curva obtiene? Cómo varía la frecuencia en función de los vientres?

28LABORATORIO 3. ONDAS ESTACIONARIAS EN UNA CUERDA TENSA

- Si la gráfica en el numeral anterior es una línea recta, haga el análisis correspondiente para obtener el valor de la densidad de masa μ (Valor experimental) con su correspondiente incertidumbre.
- Determine la densidad teórica de la cuerda (con su respectiva incertidumbre) mediante la expresión:

$$\mu = \frac{m}{\ell_T},$$

donde m , es la masa de la cuerda y ℓ_T , la longitud total de la cuerda.

- Considere este valor como teórico y compare en términos de porcentaje el valor de μ obtenido en el paso anterior.
- (b) Con los datos del numeral 4 del procedimiento:
- Construya un gráfico de frecuencia en función de la raíz cuadrada de la tensión. ¿Es su gráfica una línea recta? ¿Porqué?
 - A partir de su gráfico obtenga la ecuación que relaciona la frecuencia con la tensión y de esta ecuación obtenga un nuevo valor para μ con su respectiva incertidumbre. Compare este valor con el teórico.
- (c) Con los datos numeral 5 del procedimiento:
- Construya un gráfico de frecuencia f en función de $\frac{1}{L}$. ¿Es el gráfico una línea recta? ¿Porqué?
 - A partir de su gráfico obtenga la ecuación que relaciona la frecuencia con la longitud de la cuerda y de esta ecuación obtenga un nuevo valor para μ con su respectiva incertidumbre. Compare este valor con el teórico.
- (d) De los resultados obtenidos, determine cuál de los valores de μ es el más cercano al valor real. Justifique este resultado.

NOTA: En el documento que puede revisar en el siguiente link se ilustra el método para el cálculo de estas incertidumbres. [Hacer click para ver el documento](#)

Laboratorio 4

Ondas estacionarias en una columna de aire

4.1 Objetivos

- (a) Identificar los distintos modos de vibración de las columnas de aire en tubos abierto y cerrado.
- (b) Medir la velocidad del sonido en el aire.

4.2 Preinforme

- (a) Ilustre gráficamente los patrones de resonancia para ondas de presión en tubos abiertos y cerrados.
- (b) Explique la relación existente entre las ondas de desplazamiento y las ondas de presión en una columna de aire.
- (c) Calcule las frecuencias de resonancia para los primeros cinco modos de oscilación de la columna de aire en un tubo abierto y cerrado, utilizando las ecuaciones (4.1) y (4.2) respectivamente. Se debe tener en cuenta las correcciones de la longitud del tubo presentadas en la ecuación (4.3) y (4.4).

4.3 Fundamento Teórico

Análogamente a como se producen las ondas estacionarias en una cuerda, las ondas estacionarias en una columna de aire confinado en un tubo, se producen por la superposición de ondas longitudinales incidentes y reflejadas

30 LABORATORIO 4. ONDAS ESTACIONARIAS EN UNA COLUMNA DE AIRE

en el interior del mismo en estado de resonancia. Pero a diferencia de los modos propios de oscilación en una cuerda, en una columna de aire, estos no se pueden ver a simple vista; existen como arreglos de las moléculas de aire llamados **condensaciones** y **rarefacciones**.

Así como para el caso de la cuerda¹, la función de onda en estado estacionario para una columna de gas confinada dentro de un tubo de longitud finita, puede escribirse en términos de la ecuación:

$$\psi(x, t) = (A \sin kx + B \cos kx) \sin \omega t.$$

De la misma manera como se consideró en la sección 3.3, las frecuencias de resonancia f_n correspondientes a los distintos modos de oscilación de la columna de aire, se obtienen aplicando las diferentes condiciones de frontera. Estas se determinan por la condición del tubo.

Tubos abiertos

Si las condiciones de frontera son tales que:

- $\frac{\partial \psi(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0.$
- $\frac{\partial \psi(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0.$

Significa que en $x = 0$ y $x = L$, las moléculas de aire tienen un valor máximo de desplazamiento a partir de su posición de equilibrio, definiendo un tubo abierto en ambos extremos.

Aplicando estas condiciones de frontera en forma análoga a como se hizo para el caso de ondas estacionarias en la cuerda, se encuentra que las frecuencias de resonancia correspondientes a los distintos modos propios de oscilación de la columna de aire en un tubo abierto están dadas por:

$$f_n = \frac{n}{2L}v, \quad n = 1, 2, 3... \quad (4.1)$$

Donde v es la velocidad del sonido en el aire. La Figura 4.1 en el lado derecho, muestra el tono fundamental y algunos sobretonos para la onda φ de *desplazamiento*. Estos están desfasados 90° con las ondas de presión. Las frecuencias de resonancia f_n también se conocen con el nombre de **armónicos**.

¹ver Laboratorio 3 de este texto

Tubos cerrados

Si las condiciones de frontera son tales que:

- $\frac{\partial \psi(0,t)}{\partial x} = 0$.
- $\psi(L,t) = 0$.

Significa que en $x = 0$, la onda estacionaria tiene un valor máximo y en $x = L$ tiene un valor mínimo con respecto al desplazamiento de las moléculas de aire ó a partir de la posición de equilibrio. Esto define un tubo cerrado.

Aplicando estas condiciones de frontera y llevando a cabo los cálculos apropiados, se encuentra que las frecuencias de resonancia en tubo cerrado están dadas por:

$$f_n = \frac{n}{4L}v, \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (4.2)$$

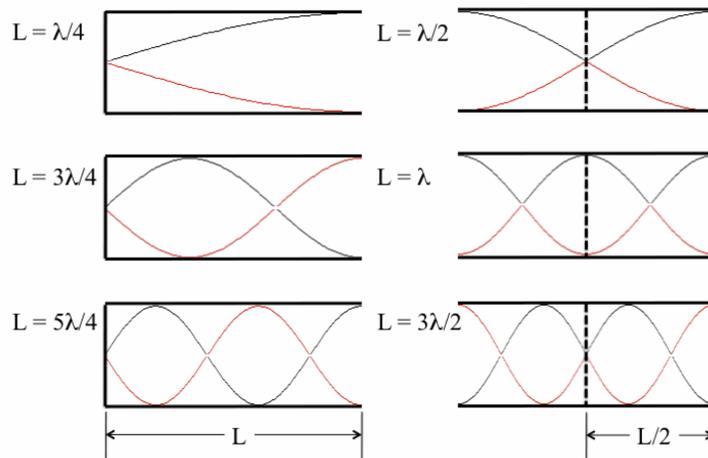


Figura 4.1: Patrones de ondas estacionarias correspondientes a *ondas de desplazamiento* para tubo cerrado y abierto.

Donde v es la velocidad del sonido en el aire. La figura 4.1 muestra los primeros tres armónicos, para tubo cerrado en el lado izquierdo y para tubo abierto en el derecho

Las fórmulas y diagramas mostrados para resonancia en tubos son aproximadas, debido a que el comportamiento de las ondas en los extremos del tubo dependen parcialmente de factores tales como el diámetro del tubo y la frecuencia de las ondas. Los extremos del tubo no son exactamente nodos o antinodos. Las siguientes fórmulas empíricas deben utilizarse para la corrección de la longitud del tubo.

Para un tubo abierto:

$$L' = L + 0,8 d \quad (4.3)$$

Para un tubo cerrado:

$$L' = L + 0,4 d \quad (4.4)$$

donde $L = 90,0$ cm es la longitud total del tubo y $d = 31$ mm su diámetro.

4.4 Materiales

- Tubo de resonancia.
- Generador de señales.
- Osciloscopio.

4.5 Precauciones

Trabajar a frecuencia máxima de 1600 Hz.

4.6 Procedimiento

4.6.1 Frecuencias de resonancia de un tubo abierto

- (a) Mida la temperatura en el laboratorio usando el termómetro de pared disponible.
- (b) Monte el equipo como se muestra en las figuras 4.2 y 4.3. Coloque el generador de señales en el modo senusoidal, con la frecuencia de salida en la escala de 1 kHz, con el dial en 0 Hz. conecte esta señal al canal CH1 del osciloscopio. Coloque la velocidad de barrido en 1 ms/div y la ganancia en el canal uno en 5 V/div. Verifique que las perillas de calibración estén giradas completamente a la derecha. Aumente levemente la frecuencia y observe la señal.



Figura 4.2: Montaje experimental

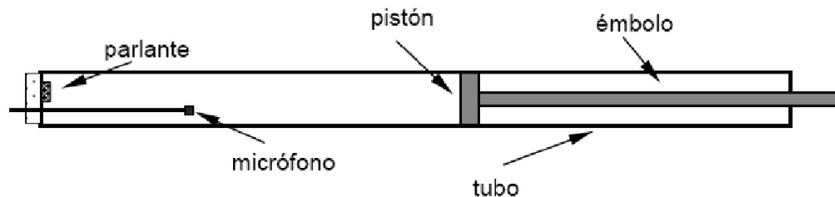


Figura 4.3: Esquema interno del tubo

- (c) Coloque el micrófono aproximadamente en la mitad del tubo. El amplificador conéctelo al canal CH2 y actívelo. Ajuste la amplitud del generador hasta que pueda distinguir el sonido proveniente del parlante. Varíe la frecuencia lentamente a partir de cero hasta que observe *el efecto de resonancia* entre las dos señales. **La condición de resonancia se observa cuando la señal del micrófono es muy similar a la proveniente del generador y además tiene una amplitud máxima.**
- (d) Tenga en cuenta que debido al ruido del laboratorio, es difícil encontrar el primer armónico. Si no lo encuentra, intente con el siguiente armónico. Utilice la perilla trigger del osciloscopio para estabilizar la señal de salida del micrófono, si es necesario. Deduzca, comparando la frecuencia encontrada con la dada por la teoría, si la primera corresponde al armónico fundamental o a otro armónico.
- (e) Una vez hallada la frecuencia de resonancia, active el modo XY del osciloscopio; su efecto es independizar las señales del tiempo, para observar la figura de Lissajous que se forma al superponerlas? Qué figura

34 LABORATORIO 4. ONDAS ESTACIONARIAS EN UNA COLUMNA DE AIRE

espera observar si hay resonancia entre las dos señales?

- (f) Desactive el modo XY y mida en el osciloscopio la frecuencia proveniente del generador. Esta es la frecuencia f_0 , correspondiente al modo fundamental (180 Hz-190 Hz) o al armónico encontrado. Verifique que es el armónico más bajo que puede de medir.
- (g) Eleve lentamente la frecuencia hasta que encuentre nuevas resonancias procediendo de la misma forma que en los pasos anteriores. Estas serán las frecuencias correspondientes a los armónicos superiores al fundamental. Encuentre al menos cinco frecuencias de resonancia. **Tenga en cuenta mover el micrófono hasta las posiciones donde se esperan observar los máximos de presión para cada armónico.** Para guiarse observe la figura 4.1. Registre los resultados en una tabla.
- (h) Para observar el patrón de la onda estacionaria, retire el micrófono lentamente y observe en la pantalla de osciloscopio la señal correspondiente a éste. ¿Corresponde lo observado con lo que espera de acuerdo a los patrones de ondas estacionarias correspondientes a ondas de presión?

4.6.2 Frecuencias de resonancia de un tubo cerrado

- (a) Coloque el émbolo dentro del tubo en la posición de 50,0 cm. Cerciórese que el extremo frente al parlante esté abierto. Coloque el micrófono dentro del tubo donde se presente un máximo de presión (cerca al pistón).
- (b) Repita el procedimiento seguido para tubo abierto, hasta el item (4e) de la sección anterior, para obtener la frecuencia correspondiente del modo fundamental.
- (c) Para hallar las frecuencias correspondientes a los armónicos superiores al fundamental repita el item (4g), pero **deje el micrófono en la posición inicial** ¿ Por qué es mejor hacer esto? Explique. Registre los datos en una tabla.
- (d) Para observar el patrón de la onda estacionaria, retire el micrófono lentamente y observe en la pantalla de osciloscopio la señal correspondiente a este? Corresponde lo observado con lo que espera de acuerdo a los patrones de onda estacionarias correspondientes a ondas de presión?

En el siguiente vídeo se observa la forma como se toman los datos, siguiendo las instrucciones del procedimiento.



[Hacer click para ver el vídeo](#)

4.7 Análisis

Frecuencias de resonancia en un tubo

- Para cada configuración del tubo (abierto y cerrado) divida cada una de las frecuencias de resonancia halladas por la frecuencia de resonancia más baja que encontró. Sus resultados deberían dar una serie de números cercanos a números enteros? Confirman sus resultados esta aseveración? Explique.
- Es la serie de números que usted ha encontrado, la misma para tubo cerrado que para tubo abierto?
- Con los datos para tubo abierto y cerrado construya dos gráficos de frecuencia en función del número de armónico. Halle la ecuación de la recta en cada caso y compárelas con la ecuación teórica para tubo abierto y cerrado respectivamente, deduzca la velocidad del sonido con su incertidumbre. En el documento que puede revisar en el siguiente link se ilustra el método para el cálculo de estas incertidumbres. [Hacer click para ver el documento](#)
- Promedie los resultados para la velocidad obtenida de los dos gráficos y obtenga el mejor estimado con su respectiva incertidumbre.
- Compare el valor obtenido con el calculado a través de la expresión $v = 333.5 + 0,607T$, donde T es la temperatura en grados Celsius medida en el laboratorio. Halle el porcentaje de error y explique las posibles razones de la discrepancia.

Laboratorio 5

Óptica Geométrica

5.1 Objetivos

- (a) Verificar experimentalmente la ley de Snell.
- (b) Determinar el índice de refracción y el ángulo de reflexión total interna de un prisma de acrílico plano convexo
- (c) Determinar la distancia focal de un lente convergente y medir la magnificación al combinar las distancias entre el objeto y su imagen.

5.2 Preinforme

- (a) Estudie las leyes fundamentales de la óptica geométrica.
- (b) Describa en qué consiste el fenómeno de reflexión total interna
- (c) Haga un diagrama de rayos para la formación de la imagen en una lente convergente y en una lente divergente
- (d) Escriba la ecuación para las lentes delgadas y establezca una convención de signos apropiada.

5.3 Fundamento Teórico

La óptica geométrica se refiere al comportamiento de los haces luminosos en los instrumentos ópticos. Se basa en cuatro leyes fundamentales las cuales son el resultado de los primeros estudios que se hicieron a cerca del comportamiento de la luz:

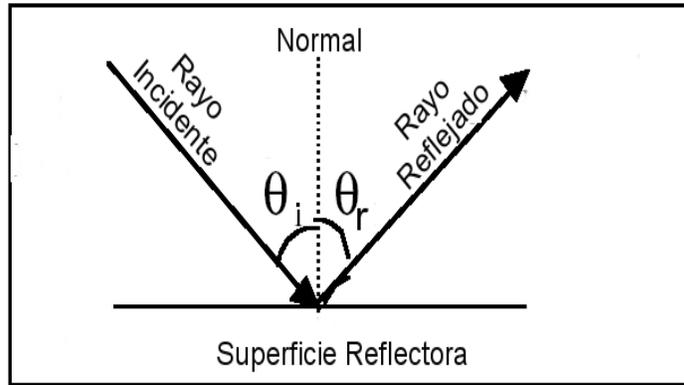


Figura 5.1: Ley de reflexión.

5.3.1 Ley de propagación rectilínea de la luz

Esta ley se enuncia de la siguiente manera:

En un medio homogéneo la luz se propaga en línea recta.

Las sombras y penumbras observadas en una pantalla provenientes de un objeto iluminado con una fuente puntual de luz o la obtención de imágenes utilizando una cámara oscura, constituyen evidencia práctica de esta ley. Su validez está restringida al caso en el cual las dimensiones del objeto sean mucho mayores a la longitud de onda de la luz utilizada. Cuando la luz interactúa con objetos que son comparables con su longitud de onda, la luz no se propaga rectilíneamente, presentándose el fenómeno de **difracción de la luz**¹ el cual hace parte del campo de la **óptica física**

5.3.2 Ley de reflexión de la luz

Cuando un rayo de luz llega a una superficie reflectora formando un ángulo de incidencia θ_i con la normal a dicha superficie, se refleja en la superficie formando un ángulo de reflexión θ_r con la misma normal (ver figura 5.1). La ley de reflexión de la luz establece que:

- (a) *El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal a una superficie reflectora están en un mismo plano.*
- (b) *El ángulo de incidencia θ_i entre el rayo incidente y la normal es igual al ángulo de reflexión θ_r entre el rayo reflejado y la normal ($\theta_i = \theta_r$)*

¹ver capítulo 6 de este texto

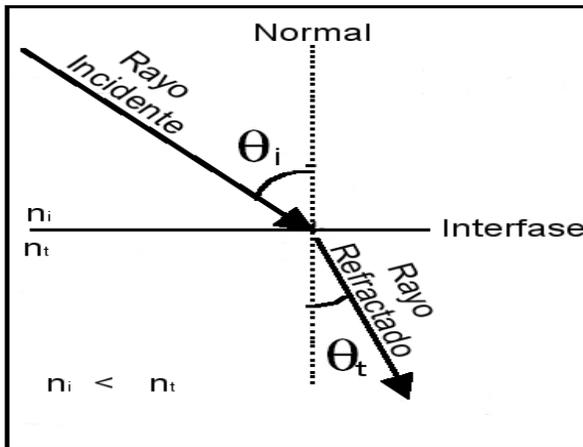


Figura 5.2: Ley de refracción.

5.3.3 Ley de refracción de la luz

Cuando un rayo de luz llega a una superficie que separa dos medios transparentes formando un ángulo de incidencia θ_i con la normal a dicha superficie, parte del rayo de luz incidente se transmite al segundo medio formando un ángulo de refracción θ_t con la misma normal (ver figura (5.2)). La ley de refracción establece que:

- (a) *El rayo incidente, el rayo refractado y la normal se encuentran en un mismo plano*
- (b) *La relación entre los senos de los ángulos de incidencia y refracción es igual a una constante dada por la relación entre las velocidades de la luz entre los medios incidente y refractante, es decir:*

$$\frac{\text{Sen } \theta_i}{\text{Sen } \theta_t} = \frac{v_i}{v_t}. \quad (5.1)$$

Lo anterior significa que cuando la luz pasa de un medio homogéneo transparente a otro medio homogéneo transparente, se observa un cambio en la dirección de la luz como producto del cambio de la velocidad.

La relación entre las velocidades de la luz en el vacío y un segundo medio, cuando esta pasa del vacío a cualquier otro medio, se conoce como **índice de refracción absoluto**, notado con la letra n , es decir:

$$n = \frac{c}{v}. \quad (5.2)$$

Sustituyendo las velocidades, expresadas mediante la ecuación (5.2), en la ecuación (5.1), se obtiene:

$$\frac{v_i}{v_t} = \frac{n_t}{n_i} = \frac{\lambda_i}{\lambda_t}, \quad (5.3)$$

con lo cual, la ley de refracción puede escribirse como,

$$n_i \text{ Sen } \theta_i = n_t \text{ Sen } \theta_t. \quad (5.4)$$

No obstante que, presumiblemente, esta relación fue obtenida en forma independiente por Snell y Descartes, en los textos de habla inglesa se le conoce como ley de Snell.

La relación $n_t/n_i = n_{ti}$, es el índice de refracción relativo de los dos medios. En general, el índice de refracción es una medida del cambio de dirección de la luz cuando ésta pasa de un medio a otro. De lo anterior se puede establecer lo siguiente:

- Si $n_{ti} > 1 \rightarrow n_t > n_i$ lo que significa que $v_i > v_t$, por consiguiente $\lambda_i > \lambda_t$.
- Si $n_{ti} < 1 \rightarrow n_t < n_i$ lo que significa que $v_i < v_t$, por consiguiente $\lambda_i < \lambda_t$.

5.3.4 Ley de independencia de los haces luminosos

Esta ley establece que los rayos, al intersectarse, no se perturban unos a otros. Las intersecciones de los rayos no impiden que cada uno de ellos se propague independientemente de cada uno de los otros. Esta ley solo se cumple si las intensidades de la luz no son demasiado grandes. Cuando las intensidades son muy altas, como las que alcanzan los láseres, la independencia de los rayos luminosos ya no se cumple. La óptica geométrica permite entender el funcionamiento de los instrumentos ópticos tales como el ojo, las gafas, cámaras fotográficas, telescopios, proyectores, microscopios, endoscopios, etc.

La base de la óptica geométrica la constituyen las cuatro leyes anteriormente enunciadas, a saber:

- (a) Ley de la propagación rectilínea de la luz.
- (b) Ley de la independencia de los rayos luminosos.
- (c) Ley de reflexión de la luz.

(d) Ley de la refracción de la luz.

5.4 Recomendaciones

- Verifique la limpieza de las superficies del prisma y la lente. Manipule estos objetos por sus bordes con el fin de evitar huellas. En caso de necesitar limpiarlos consulte con el profesor.
- Una sola persona del grupo debe manipular los instrumentos ópticos con el uso de guantes quirúrgicos. Esto con el fin de garantizar su conservación.

5.5 Materiales

- Fuente de luz OS-8470 PASCO.
- Lente convexo OS-8456 PASCO distancia focal:+100mm.
- Carril óptico.
- Pantalla blanca. (**NO DEBE RAYARSE**, se debe pegar con cinta sobre ella una hoja de papel blanco.)
- Prisma de acrílico plano convexo
- Hojas blancas (cada grupo debe traer al menos 5 hojas blancas).
- Transportador (cada grupo debe traer el propio).
- cinta métrica.
- Guantes quirúrgicos. (cada grupo debe traer al menos un par).

5.6 Procedimiento

5.6.1 Ley de Snell

- (a) Coloque Prisma de acrílico plano convexo sobre la base giratoria y haga incidir el haz de luz blanca sobre el mismo, como se observa en la figura (5.3). Note que tiene en este caso dos superficies disponibles sobre las que puede llegar el rayo incidente. Rote el lente y observe bajo que condiciones se puede obtener el ángulo crítico.
- (b) Ubique el prisma plano convexo de tal manera que el haz de luz incida sobre la superficie plana sin que se desvíe al salir del acrílico.

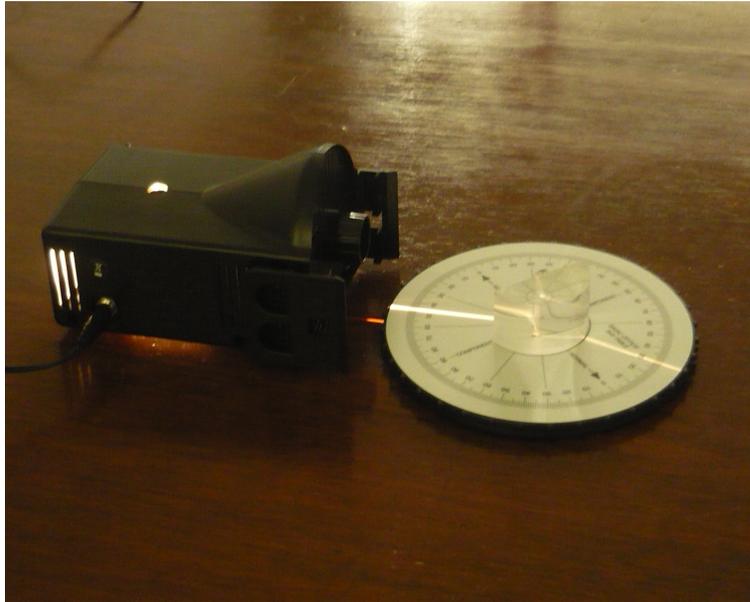


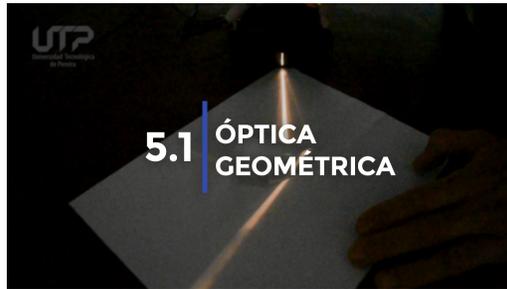
Figura 5.3: Montaje del prisma sobre la base giratoria

- (c) Realice prueba de alineación entre el ángulo incidente y reflejado, verificando que el ángulo incidente sea igual al ángulo reflejado con respecto a la normal (Ley de Reflexión).
- (d) Rote la base giratoria (graduada en grados) cada 5 grados. Mida los ángulos de incidencia, reflexión y refracción, hasta llegar a 90 grados. Anote estos valores en una tabla.
- (e) Haga incidir el rayo de luz sobre la superficie curva (convexa) y repita el proceso anterior hasta llegar a 40 grados. Continúe rotando de grado en grado hasta que el rayo refractado no se observe. Anote este valor el cual será el mínimo ángulo de reflexión total interna.

En el siguiente vídeo se observa la forma como se toman los datos, siguiendo las instrucciones del procedimiento.

Análisis

- (a) Con los datos obtenidos construya una gráfica del $\text{sen}(\theta_i)$ vs $\text{sen}(\theta_t)$.
- (b) Mediante regresión lineal halle la mejor recta de interpolación para estos datos, incluyendo el coeficiente de correlación.
- (c) Establezca la interpretación física de la pendiente de esta recta. Calcule el índice de refracción del acrílico. (Compárelo con el valor nominal 1,5)



[Hacer click para ver el vídeo](#)

- (d) A partir de la ley de Snell y con el índice de refracción calculado, determine el ángulo crítico para la refracción interna dentro del acrílico. Compárelo con el medido.
- (e) Consulte y explique el significado y utilidad que tiene el ángulo crítico o ángulo de reflexión total interna de una sustancia.

5.6.2 Óptica Geométrica



Figura 5.5: Montaje del carril óptico.

Procedimiento

- (a) Coloque la fuente de luz y la pantalla sobre el carril óptico alejados entre sí un metro, tal como se muestra en la figura (5.5). Coloque el lente convergente entre los dos objetos mencionados.

- (b) Empiece acercando el lente a la pantalla, y deslícelo por el carril alejándose de la misma hasta que llegue a una posición en la que se forme sobre la pantalla una imagen nítida (flechas cruzadas). Mida la distancia de la lente respecto de la pantalla (imagen) y de la lente respecto de la fuente de luz (objeto) y registre sus datos en la tabla (5.1).
- (c) Mida el tamaño del objeto (en la fuente de luz) y de la imagen (en la pantalla) para esta posición del lente.
- (d) Determine si hay alguna nueva posición para la lente que le permita enfocar la imagen. Registre nuevamente las medidas de distancia entre los tres componentes (pantalla-lente-fuente) y las medidas de tamaño entre dos puntos de referencia en la imagen y el objeto, para esto use la tabla (5.2). Como notará, la imagen formada sobre la pantalla es grande así que puede considerar medir solo una parte del dibujo usando la escala en milímetros que tienen las flechas iluminadas.
- (e) Repita todo el proceso desde el segundo paso para distancias variables entre la pantalla y la fuente para 90 cm, 80 cm, 70 cm, 60 cm y 50 cm; y registre nuevamente todos sus datos en las tablas (5.1) y 5.2.

Valores de distancia y tamaño de la imagen para un lente convergente.

distancia imagen-objeto (cm)	distancia lente-objeto (cm)	distancia lente-imagen (cm)	Tamaño Objeto (cm)	tamaño Imagen (cm))
100				
90				
80				
70				
60				
50				

Tabla 5.1: Posición 1 (Distancia más pequeña entre la lente y la imagen)

distancia imagen-objeto (cm)	distancia lente-objeto (cm)	distancia lente-imagen (cm)	Tamaño Objeto (cm)	tamaño Imagen (cm))
100				
90				
80				
70				
60				
50				

Tabla 5.2: Posición 2 (Distancia más grande entre la lente y la imagen)

En el siguiente vídeo se observa la forma como se toman los datos, siguiendo las instrucciones del procedimiento.



[Hacer click para ver el vídeo](#)

Análisis

- Calcule $\frac{1}{d_o}$ y $\frac{1}{d_i}$ para todos los valores de las tablas (5.1) y (5.2).
- Grafique en hoja de cálculo $\frac{1}{d_o}$ (eje Y) y $\frac{1}{d_i}$ (eje X). Observe si obtiene una relación lineal entre las variables expresadas de esta forma y trace la recta de interpolación para obtener la ecuación de la línea de tendencia que describe el comportamiento de los datos. **NOTA:** Tenga especial cuidado en **no mezclar** los datos correspondientes a dos posiciones diferentes con la misma distancia imagen-objeto. Es necesario hacer dos gráficas para cada posición.
- Compare la ecuación obtenida con la ecuación para lentes delgadas (ver preinforme). A partir de esta comparación establezca el valor de la distancia focal la lente y calcule el porcentaje de error experimental en relación con el valor teórico.
- Expresar la distancia focal obtenida con la respectiva incertidumbre. Para esto tenga en cuenta que debe determinar la incertidumbre del término independiente de la recta de interpolación como se estableció antes. (En el documento que puede revisar en el siguiente link se ilustra el método para el cálculo de estas incertidumbres. [Hacer click](#))
- Use las distancias d_o y d_i para calcular el valor esperado de la magnificación como: $M = \frac{d_i}{d_o}$
- Emplee sus datos medidos con respecto al tamaño de la imagen y al tamaño del objeto para calcular la magnificación como:

$$M = \frac{TI}{TO} \quad (5.5)$$

donde TI: tamaño imagen TO: tamaño objeto

- Compare el valor experimental de M respecto del valor esperado, y exprese cuánto es el porcentaje de error obtenido en la medida.

Laboratorio 6

Difracción de la luz

6.1 Objetivos

- (a) Estudiar el patrón de difracción dado por rendijas rectangulares sencillas, dobles y múltiples.
- (b) Medir las constantes correspondientes en cada caso

6.2 Preinforme

- (a) ¿En qué consiste el fenómeno de difracción de la luz?
- (b) ¿Qué condiciones debe cumplir una fuente de luz para que produzca un patrón de difracción observable?
- (c) ¿Cuáles son las fórmulas que definen la posición de los máximos y mínimos en un patrón de difracción?
- (d) ¿Cuál es la diferencia entre la difracción de Fresnel y la difracción de Fraunhofer? ¿Están fundamentadas en principios físicos diferentes?

6.3 Materiales

- Láser de Estado Sólido $\lambda = 670 \times 10^{-9}m$.
- Rendijas rectangulares sencillas. Se disponen cinco rendijas con los siguientes anchos de abertura, b : 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm, 1.0 mm y 1.5 mm.
- Rendijas rectangulares dobles:

Rendijas Dobles				
b (mm)	0.080		0.040	
d (mm)	0.25	0.50	0.25	0.50

- Rendijas múltiples de 2, 3, 4 y 5 rendijas ($b = 0.04$ mm, $d = 0.125$ mm.)
- Xplorer GLX.
- Sensor de luz.
- Banco óptico.
- Sensor de traslación.
- Rejilla colimadora.

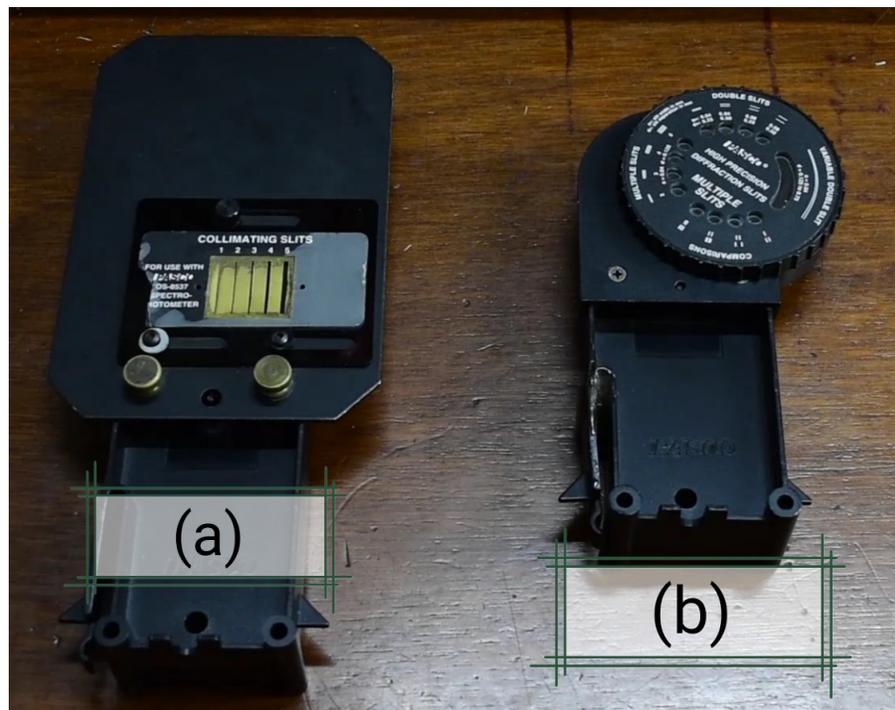


Figura 6.1: (a) Rendijas sencillas (b) Rendijas dobles y múltiples

6.4 Fundamento Teórico

En general el fenómeno de la difracción se presenta cuando una onda interactúa con objetos cuyas dimensiones son comparables con su longitud de onda. Desde el punto de vista de la teoría, que considera la luz como un fenómeno ondulatorio, el estudio de la óptica se divide en dos grandes campos: el de

la óptica geométrica y el de la óptica física. Si el objeto con el cual interactúa la luz posee dimensiones muy grandes comparadas con su longitud de onda, se estará en el campo de la óptica geométrica; pero si las dimensiones del objeto son comparables con la longitud de onda de la luz se estará en el campo de la óptica física. La longitud de onda de la luz visible está en el rango entre 780 nm y 390 nm aproximadamente. Para que la luz pueda producir un patrón de difracción observable, ésta debe interactuar con objetos que posean dimensiones comparables con estos valores; es por esta razón que el fenómeno no es fácilmente apreciable a simple vista siendo necesarias ciertas condiciones de laboratorio para ser observado.

A su vez el estudio de la difracción puede dividirse en dos partes: la difracción de Fraunhofer y la difracción de Fresnel. En la difracción de Fraunhofer se supone que las ondas incidentes al objeto son planas al igual que las ondas emergentes del mismo. La distancia entre el objeto y la pantalla sobre la cual se observa el patrón, debe ser grande comparada con las dimensiones del objeto. La difracción de Fresnel tiene lugar cuando la fuente puntual de las ondas incidentes, o el punto de observación desde el cual se las ve, o ambos, están a una distancia finita del objeto. El dispositivo experimental que se utiliza en este laboratorio coincide con la concepción de Fraunhofer de la difracción.

6.4.1 Difracción de Fraunhofer por una rendija rectangular

La teoría asociada con la difracción por una rendija rectangular considera una rendija muy angosta (de las dimensiones de la longitud de onda de la luz) y muy larga. En concordancia con el principio de Huygens, cada punto del frente de onda plano se convierte en fuente de pequeñas ondas esféricas secundarias; estas ondas secundarias, llamadas ondas difractadas, luego se recombinan constructiva o destructivamente en una pantalla sobre la cual es posible observar un patrón de difracción cuya distribución de intensidad luminosa a lo largo de ella, corresponde al dibujo de la figura 6.2.

En la práctica lo que se observa en la pantalla es una zona muy brillante central acompañada de una serie de zonas brillantes y oscuras (las brillantes cada vez de intensidad menor), alternadamente alrededor de dicho máximo. (Figura 6.3.)

Puede demostrarse que la condición para que haya interferencia destructiva en la pantalla se puede expresar mediante la ecuación:

$$b \operatorname{Sen} \theta = m\lambda \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (6.1)$$

Donde: b es el ancho de la rendija, θ es la separación angular entre el centro

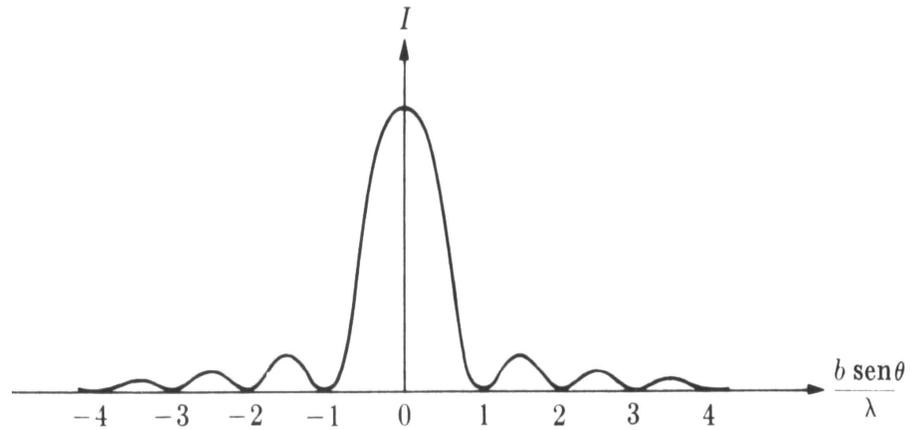


Figura 6.2: Distribución de intensidad en el diagrama de difracción de una rendija angosta y larga.

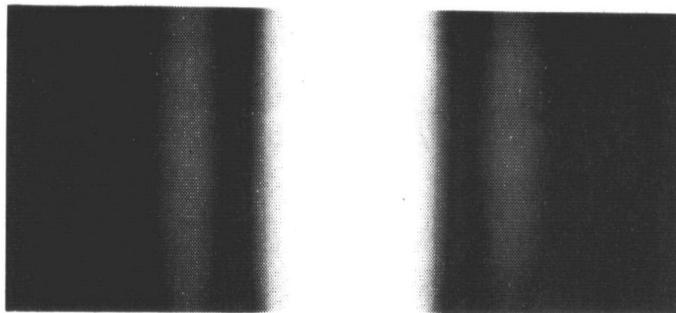


Figura 6.3: Diagrama de difracción de Fraunhofer producido por una rendija angosta y larga.

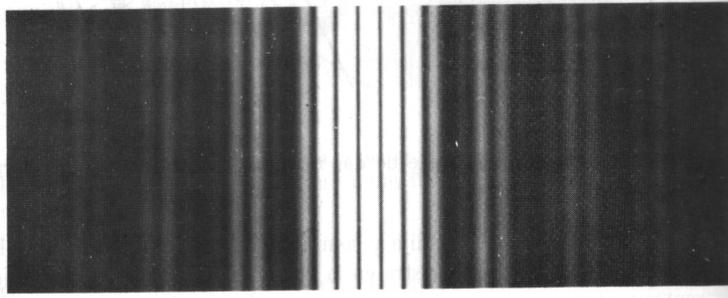


Figura 6.4: Diagrama de difracción de Fraunhofer debido a dos rendijas paralelas angostas y largas.

del máximo central y el centro de los **mínimos o regiones oscuras** observados, m es el orden del patrón de difracción para los mínimos de intensidad (m aumenta hacia los extremos del patrón de difracción) y λ es la longitud de onda de la luz incidente.

6.4.2 Difracción de Fraunhofer por una rendija doble

El patrón de difracción por dos rendijas paralelas iguales, resulta de la interferencia de los dos patrones de difracción provenientes de cada una de las rendijas. Lo que se observa en la pantalla es un patrón de interferencia de Young producido por dos rendijas rectangulares modulado por un patrón de difracción de Fraunhofer por una rendija rectangular. En este caso los **máximos** de interferencia están dados por la siguiente expresión:

$$d \operatorname{Sen} \theta = m\lambda \quad m = 1, 2, 3 \quad (6.2)$$

Donde: d es la distancia entre las dos rendijas, θ es la separación angular entre el máximo de interferencia central y los **máximos secundarios**, m es el orden del patrón de difracción para los **máximos** de interferencia y λ la longitud de onda de la luz.

6.4.3 Difracción por múltiples rendijas - Rejillas

La rejilla de difracción consiste en un gran número de rendijas paralelas idénticas de ancho b y separadas una distancia d . Cuando la rejilla es iluminada convenientemente, el patrón observado en la pantalla consiste en la distribución de interferencia producida por N rendijas, modulado por un patrón de difracción de una sola rendija. En la práctica lo que se observa es una forma parecida al patrón de difracción para la rendija doble extendida al caso de N

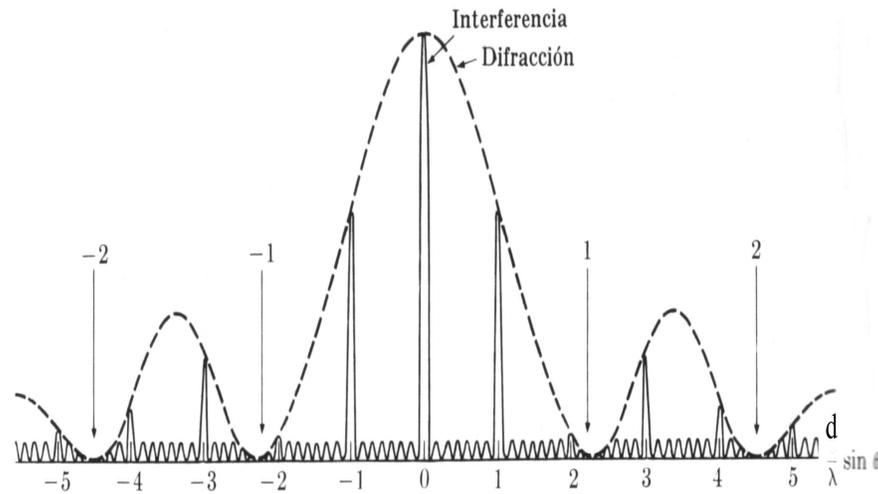


Figura 6.5: Distribución de intensidad producida por una red de difracción sobre un plano normal a la luz incidente y paralelo a la red.

rendijas. En este caso la condición para interferencia constructiva está dada por la expresión:

$$d \operatorname{Sen} \theta = m \lambda. \quad (6.3)$$

Donde: d es la distancia entre las rendijas o constante de la rejilla, θ es la separación angular entre los máximos secundarios y el máximo central, m es el orden del patrón de difracción para máximos de intensidad, λ es la longitud de onda de la luz utilizada para obtener el patrón de difracción.

6.5 Procedimiento

IMPORTANTE: MANIPULAR LAS RENDIJAS CON SUMO CUIDADO Y SOLO GIRANDO LA RUEDA SELECTORA—NO TOCAR LAS RENDIJAS DIRECTAMENTE.

6.5.1 Difracción por una rendija rectangular

- Coloque el accesorio de rejillas simples en el banco óptico. Debe sujetarlo lateralmente y hacer poca presión para que se acople al banco. No fuerce el accesorio pues lo puede quebrar. Sitúelo a 1.00 m de distancia del sensor de luz.



Figura 6.6: Montaje experimental.

- (b) Encienda el láser y asegúrese que la luz incida sobre la primera y más estrecha de las rejillas rectangulares.
- (c) Asegúrese que el colimador situado en frente del sensor de luz esté colocado correctamente. Debe estar en la abertura más estrecha (0,1 mm) para minimizar la luz ambiental incidente sobre el sensor. Además, verifique que el patrón de difracción observado incida horizontalmente en la parte blanca del colimador. Guíese por la figura 6.7
- (d) El sensor de traslación tiene un tope asegurado con tornillo. Muévelo de tal forma que el sensor de luz se encuentre justo en uno de los extremos visibles del patrón de difracción. En ese punto asegure el tope con el tornillo. Todas sus medidas para ese patrón se harán a partir de ese punto.
- (e) Para tomar la primera medida, un miembro del grupo deberá desplazar el sensor lentamente sobre su propio carril desde el tope plástico hasta el otro extremo del patrón de difracción. Otro miembro del equipo deberá iniciar la medida clicando sobre la opción “**START**”, sobre la pantalla de la computadora, cuando inicie el desplazamiento del sistema y deberá finalizar la medida cuando se llegue al extremo del patrón clicando “**STOP**”. La forma sugerida de desplazar el sistema se puede observar en la figura 6.8

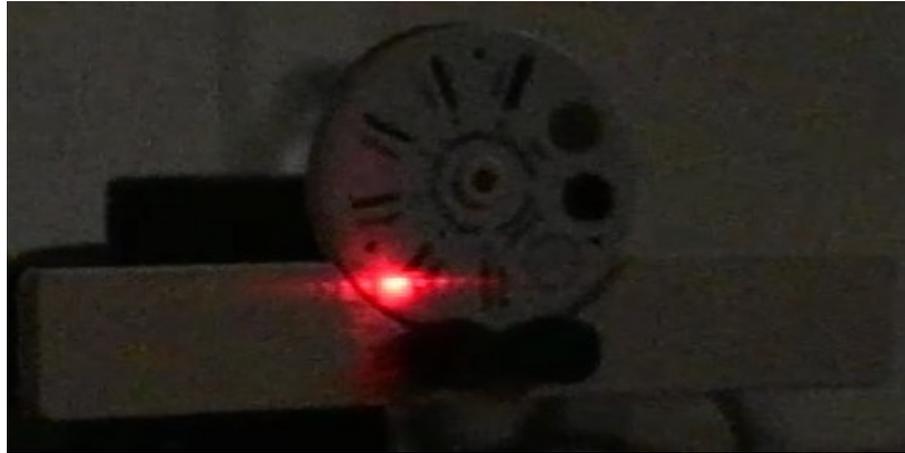


Figura 6.7: Correcto alineamiento del patrón de interferencia.



Figura 6.8: Forma recomendada para desplazar el sistema del sensor de luz.

- (f) Repita sus medidas ahora para la segunda rendija. Para localizarla afloje el tornillo del accesorio y traslade suavemente la plaqueta con rendijas hasta que la luz láser incida sobre la segunda.

6.5.2 Difracción por rendija doble

- (a) Monte el accesorio con múltiples rendijas en lugar del accesorio de rendi-

jas simples.

- (b) Escoja en primer lugar una de las rendijas dobles disponibles en el accesorio. Rote el accesorio para hacer incidir la luz láser sobre esta.
- (c) Repita la toma de datos de la misma forma que para la rendija sencilla. Ahora su patrón de difracción deberá ser parecido al de la figura 6.4. Recuerde que puede repetir su toma de datos hasta obtener el patrón de difracción más claro posible. Puede que sea necesario modificar la sensibilidad del sensor de luz.
- (d) Repita su toma de de datos para otra rendija doble con una separación entre rendijas diferentes.
- (e) Recuerde de anotar cuales medidas (run 1, run 2, ... etc.) corresponden a cada rendija.
- (f) Recuerde además que usted puede escoger cualquier par de rendijas dobles del conjunto disponible.

6.5.3 Múltiples rendijas de Difracción

- (a) Con el mismo montaje utilizado en el numeral anterior haga incidir la luz del láser sobre alguna de las posiciones del accesorio con más de dos rendijas.
- (b) Realice la toma de datos teniendo en cuenta los pasos seguidos anteriormente.
- (c) Recuerde siempre anotar qué medidas (run 1, run 2, ... etc.) corresponden a cada rendija.

En el siguiente vídeo se observa la forma como se toman los datos, siguiendo las instrucciones del procedimiento.

6.6 Análisis

Utilizando un programa como el EXCEL, mida gráficamente las distancias entre el máximo central y mínimos a cada lado en el caso de difracción por una sola rendija. Para dos o más rendijas mida la distancia entre el máximo central y los máximos y mínimos secundarios laterales.

- Con los datos obtenidos en el numeral 6.5.1 y con la ecuación 6.1. Encuentre el ancho de la rendija rectangular usada. Compare el valor



[Hacer click para ver el vídeo](#)

obtenido con el proporcionado por el fabricante. Halle el error porcentual en la medida de b . Escriba el valor de b con la incertidumbre en la medición (tenga en cuenta que b es función de θ).

- Con los datos obtenidos en el numeral 6.5.2 y con las ecuaciones 6.1 y 6.2, encuentre la separación d y el ancho b para cada una de las rendijas dobles. Halle el error porcentual en la medida en cada caso.
- Con los datos obtenidos en el numeral 6.5.3 y con las ecuaciones 6.1 y 6.3, encuentre el número de líneas por centímetro para cada una de las rejillas. Compare estos resultados con los proporcionados por el fabricante.