



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS SOCIALES Y ADMINISTRATIVAS

**LABORATORIO DE FÍSICA**

# **FISICA EXPERIMENTAL II**

**INSTRUCTIVO DE ACTIVIDADES  
EXPERIMENTALES**

AGOSTO DE 2005



***AUTORES:***

*ING. JOSÉ LUIS FABIÁN RUÍZ*

*DR. APOLONIO GALLEGOS DE LA CRUZ*

*M. EN I. MIGUEL GARCÍA MORALES*

*LIC. FERNANDO GARZÓN GARCÉZ*

*M. EN C. JOSÉ LUIS MORALES HERNÁNDEZ*

*M. EN C. FRANCISCO RAMÍREZ TORRES*

*ING. RAMÓN MANZANILLA ONTIVEROS*

*LIC. ALAN AUGUSTO GALLEGOS CUELLAR*

Como consecuencia de un estudio de la problemática actual que enfrenta el egresado de Ingeniería Industrial (de la UPIICSA) en su desempeño profesional, así como la necesidad de que éste tenga tanto una visión muy específica del campo de su especialidad, y al mismo tiempo un campo visual mucho más amplio de la física, se inicia a mediados de 1997 una reestructuración profunda de los planes de estudio de la carrera de Ingeniería Industrial y en consecuencia también un rediseño de las asignaturas que imparte la Academia de Física.

Así nace la asignatura de Física Experimental II; el diseño del programa de esta nueva asignatura queda enmarcado dentro de necesidades y restricciones: por un lado la necesidad de un programa que satisfaga los requerimientos de extensión, profundidad clásica y modernidad, pero al mismo tiempo con las restricciones económicas propias de la actualidad.

En este contexto es necesario aprovechar equipo y materiales existentes así como también experiencias ya vertidas por algunos profesores en cursos semejantes. A pesar de lo anterior, se preserva la filosofía de carácter inductivo que caracteriza tradicionalmente el proceso de enseñanza-aprendizaje en los Laboratorios de Física, el cual es necesario a fin de no coartar la iniciativa propia de los alumnos.

Como todo trabajo que inicia, éste no está exento de errores, en consecuencia todas las críticas serán bienvenidas para que en un corto plazo, éstas sirvan para enriquecer el trabajo.

**APOLONIO GALLEGOS DE LA CRUZ**

**ENERO 2006**



CONTENIDO	Pág.
<i>Prólogo</i>	1
<i>Reglamento Interno de los Laboratorios de Física</i>	2
<i>Plan de Trabajo para el Semestre Enero - Junio 2006</i>	4
<i>Aleatoriedad en la cantidad Física dependiente 1ª Parte</i>	6
<i>Aleatoriedad en la cantidad Física dependiente 2ª Parte</i>	14
<i>Movimiento Uniformemente Acelerado</i>	21
<i>Máquina de Atwood</i>	25
<i>Análisis del Movimiento de Rotación y del Movimiento de Rodadura</i>	35
<i>Propiedades Elásticas de los Materiales:</i>	43
<i>Módulo de Young (cuerpos elásticos e inelásticos)</i>	
<i>Oscilaciones Mecánicas:</i>	
<i>Péndulo simple</i>	50
<i>Péndulo Simple con Videocom</i>	55
<i>Movimiento Armónico Simple</i>	57
<i>Generación y propagación de ondas mecánicas:</i>	
<i>Vibraciones de una cuerda</i>	64
<i>Ondas superficiales en un líquido</i>	71
<i>Reflexión de luz e imágenes en espejos planos y esféricos</i>	80
<i>Refracción de luz</i>	86
<i>Interferencia de ondas de luz: Un estudio cualitativo</i>	96
<i>Difracción de la luz por una rendija Doble</i>	102
<i>Polarización de la luz</i>	109
<i>Sugerencias para elaborar un reporte</i>	115
<i>Apéndice A: Tabla de Fisher</i>	117
<i>Apéndice B: Proceso de Tres Pasos</i>	118



## REGLAMENTO INTERNO

### **INSCRIPCIÓN.**

- a) Los grupos de Laboratorio de Física son de un máximo de 20 alumnos para las secuencias numéricas y 20 para las alfabéticas. Los profesores de las secuencias no darán autorización para inscribir alumnos.
- b) Sólo se atenderán los alumnos inscritos oficialmente.
- c) El laboratorio no aceptará alumnos una vez concluido el período de inscripción
- d) El laboratorio aceptará alumnos que estén en proceso de inscripción, dependiendo del número de alumnos inscritos y que asistan, así como del cupo de cada secuencia.

### **ASISTENCIA.**

- a) La tolerancia máxima de entrada al laboratorio será de 15 minutos.
- b) El retardo a clase se considera máximo a los 20 minutos del horario asignado.
- c) Tres faltas, causan baja y reprobación del curso.
- d) Cinco retardos, causan baja y reprobación del curso.
- e) Cualquier retardo o falta del profesor deberá ser reportado a la Jefatura de los Laboratorios.
- f) La ausencia del personal del almacén de los laboratorios deberá ser reportada a la Jefatura de la Sección.
- g) Cualquier falta colectiva no justificada a la clase del laboratorio, será considerada como experimento visto.
- h) Los alumnos podrán reponer hasta dos prácticas durante el semestre, dependiendo de las condiciones de espacio y tiempo, así como de los acuerdos de Academia.

### **AULA**

- a) Los equipos de trabajo se integrarán dependiendo de los materiales y aparatos, lo ideal es de 4 alumnos por equipo.
- b) Los integrantes de los equipos deberán participar en el desarrollo de los experimentos.
- c) El alumno deberá presentar su instructivo, en caso contrario no se le permitirá el acceso al laboratorio.
- d) Los alumnos deberán estudiar su instructivo y el tema a desarrollar, con base a su plan de trabajo, en caso contrario el profesor podrá sancionar con la suspensión de la actividad experimental.
- e) En las mesas de trabajo se tienen 4 divisiones para que los alumnos depositen su material escolar, razón por la cual sólo se permitirá sobre las mesas el instructivo, material y equipo a utilizar.
- f) El alumno que se sienta sobre las mesas de trabajo será sancionado con la suspensión del experimento.
- g) No se permite la estancia en los laboratorios cuando no haya clase.

### **CLASES.**

- a) Las clases deberán ser de 100 minutos.
- b) No se deberá realizar más de un experimento por sesión.
- c) No se permitirá realizar experimentos en otras secuencias, aunque sean del mismo profesor.
- d) Las clases inician la primer semana del calendario oficial, excepto en casos de fuerza mayor.

### **MATERIALES.**

- a) Se deberá llenar un vale al almacén y anexar la credencial actualizada para que se preste el equipo y los materiales a utilizar.
- b) Los integrantes de los equipos de cada secuencia se harán responsables del equipo y los materiales que ampara el vale.
- c) El equipo y los materiales dañados por los alumnos serán repuestos en un plazo máximo de dos semanas, de no ser así, se quedará la credencial en el almacén y se reportará a las autoridades.
- d) El personal del almacén deberá entregar el material y equipo limpio y en buen estado, en caso contrario deberá reportarse a la Jefatura de los Laboratorios.
- e) Al finalizar el experimento, los alumnos deberán entregar en el almacén el material y equipo completo y en buen estado para recoger su credencial.
- f) Cuando se adeude material, los alumnos quedarán sin derecho al examen departamental correspondiente.
- g) Para utilizar equipo y material fuera del horario de la secuencia correspondiente, se deberá contar con la autorización de la Jefatura de los Laboratorios y dentro del horario del personal del almacén.

### **SEGURIDAD E HIGIENE**

- a) Se establecerán las disposiciones necesarias y suficientes para el uso de altos voltajes que puedan poner en peligro la integridad de las personas dentro de los laboratorios al realizar los experimentos.
- b) Los alumnos no deben permanecer sentados en las escaleras y/o platicar en los pasillos.
- c) Se realizarán simulacros de evacuación por lo que es necesario que las puertas de acceso a los laboratorios queden abiertas.
- d) Las aulas, al iniciar las clases, deberán estar limpias en los pizarrones, mesas de trabajo y piso. Se tendrán recipientes para la basura y de ser posible hacer la separación de la misma. Cualquier anomalía, reportarla a la Jefatura de los Laboratorios.
- e) No se permite fumar en las aulas de los laboratorios.

### **EVALUACIÓN**

- a) El laboratorio se considera acreditado cuando la calificación sea mínimo de seis.
- b) El porcentaje mínimo de asistencia para tener derecho a acreditar el laboratorio es del 80%.
- c) Los alumnos que reprueben el laboratorio, deberán cursarlo por segunda vez. En caso de reprobación por segunda ocasión, tendrán derecho a presentar un período de acreditamiento durante el período de E.T.S., el que se programará al finalizar el semestre y dependiendo de los acuerdos de las Academias.
- d) En el formato de actividades se establecen los porcentajes de evaluación.



## PLAN DE TRABAJO

### PARA EL LABORATORIO DE FÍSICA EXPERIMENTAL II SEMESTRE ENERO — JUNIO 2006

FECHA	SESIÓN	1er. DEPARTAMENTAL
	01	Planteamiento del curso. Película
	02	Aleatoriedad en la variable dependiente (1ª Parte). Experimento 1: Plano inclinado $Y = Y(X)$
	03	Aleatoriedad en la variable dependiente (2ª Parte) Experimento 2: Plano inclinado (continuación) * Movimiento Uniformemente Acelerado con Videocom.
	04	Experimento 3: Máquina de Atwood.
	05	Momento de Inercia de sólidos diversos. Experimento 4: Inercia rotacional de una esfera.

FECHA	SESIÓN	2o.- DEPARTAMENTAL
	06	- Propiedades elásticas de los materiales. Experimento 5: Módulo de Young.
	07	- Oscilaciones Mecánicas. Experimento 6: Péndulo simple. Como parte complementaria se realiza el experimento de Péndulo Simple con Videocom.
	08	- Oscilaciones Mecánicas. Experimento 7: Sistema masa – resorte.
	09	- Ondas longitudinales y transversales. Experimento 8: Propagación de ondas mecánicas.

FECHA	SESIÓN	3er. DEPARTAMENTAL
	11	- Experimento 9: Ondas superficiales en un líquido.
	12	- Experimento 10: Reflexión de luz e imágenes en espejos planos y esféricos - Experimento 11: Refracción de luz.
	13	- Experimento 12: Interferencia de ondas de luz: un estudio cualitativo.
	14	- Evaluación del proyecto de investigación.
	15	- Reposición de práctica

ACTIVIDAD A EVALUAR	% CON PROYECTO EXPERIMENTAL	% SIN PROYECTO EXPERIMENTAL
Desarrollo experimental	10%	10%
Reporte por equipo	20%	20%
Tres exámenes departamentales	60%	70%
Proyectos experimentales	10%	—



## ALEATORIEDAD EN LA CANTIDAD FÍSICA DEPENDIENTE (1A. PARTE)

### OBJETIVOS:

*Al finalizar el experimento el alumno:*

- ◇ Visualizará la aleatoriedad de la variable dependiente como una Población.
- ◇ Visualizará la dispersión sobre la Línea de Mejor ajuste como otra Población
- ◇ Calculará las Varianzas ( $\sigma^2$ ) de cada una de las dos poblaciones
- ◇ Aplicará el criterio para determinar la relación lineal entre variables.

### INTRODUCCIÓN TEÓRICA.

En esta práctica, se abordará el tema de la determinación de la ley física y su comprobación cuando se ha detectado o se considera una aleatoriedad en la cantidad física dependiente y una aleatoriedad insignificante o nula en la cantidad física independiente. Esto quiere decir, que es posible detectar valores diferentes de la cantidad física dependiente para un valor fijo de la cantidad física independiente. Ante esta situación, al reproducir el fenómeno por una sola vez y determinar la Ley Física utilizando el procedimiento establecido en prácticas anteriores, es probable que se presenten coincidencias que provoque que esta ley física no represente adecuadamente el comportamiento real del fenómeno. Para evitar lo más posible estos resultados fortuitos, es conveniente reproducir varias veces el experimento y conjuntar la información de todos ellos para determinar la ley física. El procedimiento estadístico para determinar la ley física en tales casos es el tema de ésta y las siguientes prácticas que se desarrollarán en orden siguiente: En esta práctica se expone lo relacionado con el análisis de varianza, su propósito y sus limitaciones, así como el criterio utilizado para definir la ley física de tipo lineal. En la siguiente práctica se expone una variante cuando el criterio de aceptación no se cumple y de esta forma poder determinar Leyes Físicas de tipo No Lineal.

### ANÁLISIS DE VARIANZA.

La varianza ( $\sigma^2$ ) es un concepto que pertenece a la teoría de la probabilidad, que representa en términos generales, la aleatoriedad de una variable. Esta varianza es uno de los parámetros más utilizados, junto con el parámetro llamado valor esperado (o valor medio  $\mu$ ), para representar el comportamiento de una variable aleatoria. De tal forma que si se desea comparar el comportamiento de dos procesos o eventos aleatorios con el propósito de demostrar su semejanza o sus diferencias, se puede lograr comparando los valores de sus valores esperados o los valores de sus varianzas. El comparar dos eventos aleatorios es una práctica muy común en la formu-



lación de hipótesis estadísticas. Estas hipótesis estadísticas son afirmaciones o conjeturas acerca de una o más poblaciones o eventos, así por ejemplo, se formulan hipótesis respecto a la igualdad entre los valores medios o valores de las varianzas de las dos poblaciones. Es decir, se desea saber si las varianzas de dos poblaciones son iguales  $(H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2)$  o son diferentes  $(H_0 : \sigma_1^2 \leq \sigma_2^2)$

Debido a que el tamaño de las poblaciones son, en muchos casos infinitas, se procede a estudiar sólo una parte de estas poblaciones (se extrae una muestra) y con el resultado de estos estudios se procede a emitir un juicio sobre la veracidad o falsedad de la hipótesis planteada. Pero estos juicios están expuestos a errores con una probabilidad  $\alpha$ , porque no se estudió toda la población, entonces se dice que el juicio de validez o falsedad de la hipótesis tiene un Nivel de Confianza del  $100(1-\alpha)\%$ , lo que equivale a decir que se está en la posición de aceptar una hipótesis como verdadera cuando ésta en realidad es falsa con una probabilidad  $\alpha$ .

Por ejemplo, considere dos eventos aleatorios, sea el primero de ellos el evento de la medición de la cantidad física dependiente en un proceso experimental, este evento presenta una aleatoriedad que es posible cuantificar por medio de su varianza. Sea el segundo evento aleatorio el que considere la aleatoriedad que presenta la cantidad física dependiente respecto a la línea de mejor ajuste  $(Y = m \cdot X + b^*)$ , la cual se puede cuantificar calculando su varianza

Es importante demostrar que estos dos eventos tienen varianzas semejantes porque con esto se demuestra que la aleatoriedad en la línea de mejor ajuste es adecuada, ya que su aleatoriedad se puede explicar por la aleatoriedad en la medición de la cantidad física dependiente.

Por estar fuera del alcance de estas notas, no se expondrá en todos sus detalles la prueba de Hipótesis que plantea la igualación de dos varianzas, pero si se aplicaran sus resultados para demostrar estadísticamente que existe una relación lineal entre dos variables.

Supóngase que se tienen dos conjuntos de observaciones  $(n_1, n_2)$ . Si se establece la hipótesis que las varianzas de los conjuntos son idénticas entonces la relación de sus varianzas es una variable aleatoria con una función  $(H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2)$  de distribución de Fisher  $(f_1, f_2)$ . Donde  $f_1$  son  $F = \sigma_2^2 / \sigma_1^2$  los grados de libertad del numerador y  $f_2$  son los grados de libertad de denominador.

### VARIANZA EN LA LÍNEA DE MEJOR AJUSTE ( $\sigma_{Ly}^2$ )

Cuando se determina la línea de mejor ajuste para un conjunto de datos experimentales y se traza esta línea sobre la gráfica de dispersión, se observa que la línea de mejor ajuste no pasa sobre todos los puntos experimentales, es decir, se observa una aleatoriedad de los puntos experimentales alrededor de la línea de mejor ajuste. Para cuantificar esta aleatoriedad de la cantidad física dependiente, se utiliza el concepto de Varianza en la línea,  $\sigma_{Ly}^2$ , que es una forma de cuantificar la varianza en la línea de mejor ajuste.

La magnitud de la varianza en la línea, indica la cercanía de los valores experimentales de la cantidad física dependiente con las ordenadas definidas por la línea recta ajustada. Un valor pequeño de esta dispersión indica una gran representatividad y en caso contrario un valor grande indica una pobre representatividad de la línea ajustada. Los términos pobre y gran representatividad son términos subjetivos que es necesario sustituir por términos más adecuados, los cuales están contenidos en el criterio de aceptación que se expone más adelante.

### CÁLCULO DE LA DISPERSIÓN EN LA LÍNEA ( $\sigma_{Ly}^2$ )

- Determine la línea de mejor ajuste  $Y = m \cdot X + b^*$ .
- Determine los valores ajustados de las ordenadas  $\hat{Y}_i = m \cdot X_i + b^*$  para  $i = 1, \dots, n$ .
- Calcule  $(Y_i - \hat{Y}_i)^2$  para  $i = 1, \dots, n$

$$d) \text{ Calcule } \sigma_{Ly}^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

### VARIANZA EN LA CANTIDAD FÍSICA DEPENDIENTE ( $\sigma_Y^2$ ).

La varianza en la cantidad física dependiente se evalúa por medio de la varianza en la medición de la cantidad física dependiente, para esto es necesario repetir el proceso de medición, en este caso se propone repetir el proceso cinco veces ( $k = 5$ ). Con este procedimiento, se tienen cinco tablas de resultados y cada tabla contiene  $n$  parejas de valores ( $n = 15$ ) como muestra la tabla I.1.

n	X <sub>i</sub>	Y <sub>i</sub> (1)	Y <sub>i</sub> (2)	Y <sub>i</sub> (3)	Y <sub>i</sub> (4)	Y <sub>i</sub> (5)	$\bar{Y}_i$	$\sigma_{Yi}^2$
1	X <sub>1</sub>	Y <sub>1</sub> (1)	Y <sub>1</sub> (2)	Y <sub>1</sub> (3)	Y <sub>1</sub> (4)	Y <sub>1</sub> (5)	$\bar{Y}_1$	$\sigma_{Y1}^2$
2	X <sub>2</sub>	Y <sub>2</sub> (1)	Y <sub>2</sub> (2)	Y <sub>2</sub> (3)	Y <sub>2</sub> (4)	Y <sub>2</sub> (5)	$\bar{Y}_2$	$\sigma_{Y2}^2$
3	X <sub>3</sub>	Y <sub>3</sub> (1)	Y <sub>3</sub> (2)	Y <sub>3</sub> (3)	Y <sub>3</sub> (4)	Y <sub>3</sub> (5)	$\bar{Y}_3$	$\sigma_{Y3}^2$
:	:	:	:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:	:	:
n	X <sub>n</sub>	Y <sub>n</sub> (1)	Y <sub>n</sub> (2)	Y <sub>n</sub> (3)	Y <sub>n</sub> (4)	Y <sub>n</sub> (5)	$\bar{Y}_n$	$\sigma_{Yn}^2$

Tabla I.1. Tabla de valores originales.

La varianza en la medición de la cantidad física dependiente ( $\sigma_Y^2$ ), será la varianza promedio en los quince puntos.

$$\sigma_Y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_{Yi}^2$$

Donde:  $\sigma_{Yi}^2$  es la varianza en el renglón i-esimo.

En la evaluación de las varianzas y de su comparación, se basa el criterio para determinar la validez de una relación lineal. Una de las varianzas es la referente a la aleatoriedad encontrada en la línea de mejor ajuste, la cual se cuantifica por medio de la Varianza en la Línea ( $\sigma_{Ly}^2$ ). La otra varianza es la referente a la medición de la cantidad física dependiente la cual se cuantifica por medio de la Varianza promedio de la Ordenada ( $\sigma_Y^2$ ). Se acepta estadísticamente, que existe una relación lineal entre las cantidades físicas si la Varianza en la Línea ( $\sigma_{Ly}^2$ ), es comparable con la Varianza en la medición de la cantidad física dependiente ( $\sigma_Y^2$ ).

### CRITERIO DE ACEPTACIÓN

Se acepta que existe una relación lineal entre las variables involucradas, dada por la línea de mejor ajuste, si se cumple la desigualdad:

$$\sigma_{Ly}^2 \leq (I.A.) * \sigma_Y^2$$

donde I.A. = Índice de Aceptación

En caso contrario **NO** se acepta que existe una relación lineal entre las variables.

El valor del índice de aceptación define la diferencia máxima aceptada entre las dos varianzas y su valor depende del nivel de confianza definido, por ejemplo, para un nivel de confianza **100(1- a)% = 95%**, se consultan las tablas estadísticas de la distribución de Fisher con **a=0.05 (F<sub>0.05</sub>)** con parámetros **f<sub>1</sub> = n-2 = 13** y **f<sub>2</sub> = n(k-1) = 60** con **n = 15** y **k = 5**, se obtiene un **Índice de Aceptación** de 1.887. Este mismo índice se puede encontrar en la tabla contenida en el Apéndice **A** de este instructivo, de tal forma que el criterio de aceptación queda:

$$\sigma_{L_y}^2 \leq (1.887) * \sigma_Y^2 \quad 1$$


## MATERIAL UTILIZADO

- ⇒ Riel de colchón de aire.
- ⇒ Compresor de aire.
- ⇒ Deslizador amarillo con acrílico.
- ⇒ Cinta registradora.
- ⇒ Generador de descargas eléctricas.

## DESARROLLO EXPERIMENTAL

### Movimiento rectilíneo de un móvil sobre un plano inclinado.

1. Considere el dispositivo formado por un riel de colchón de aire en posición inclinada y un deslizador que pueda desplazarse a lo largo de todo el riel. (Figura 1).
2. Formule una hipótesis referente al tipo de movimiento que desarrolla el deslizador.

 Hipótesis

3. Desarrolle el proceso de experimentación en sus seis pasos para verificar la hipótesis planteada, mediante el orden siguiente:
  - a) Considere las cantidades físicas directas del fenómeno: **Desplazamiento del deslizador sobre el riel y el tiempo.**
  - b) Considere al tiempo como la cantidad física independiente (X). Y como cantidad física dependiente (Y) al desplazamiento del deslizador. Verifique el buen funcionamiento del generador de descargas.

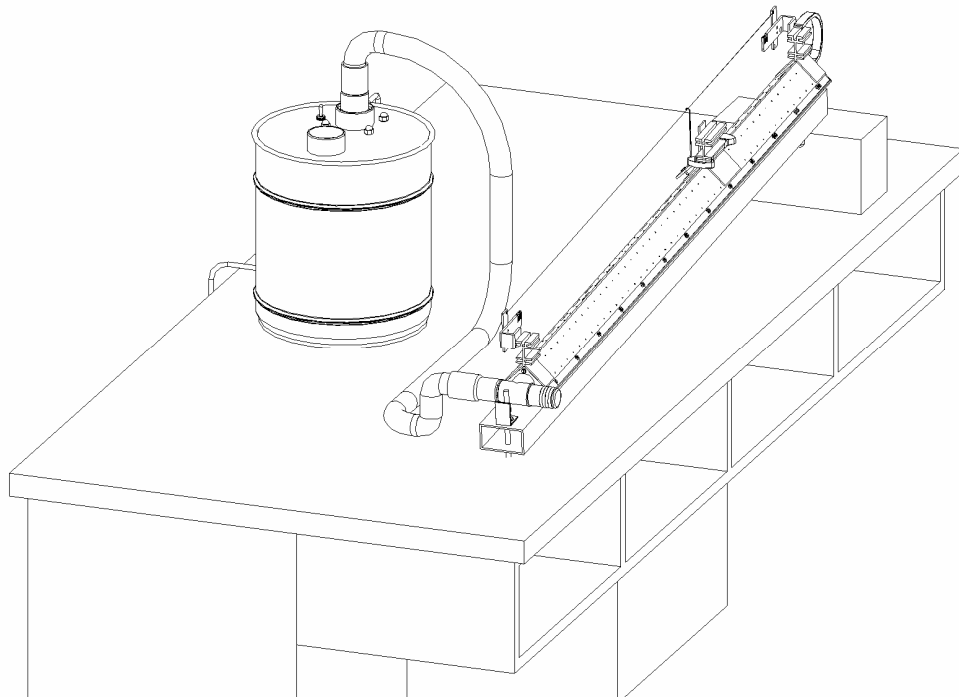


Figura 1. Movimiento de un móvil sobre un plano inclinado

c) Reproduzca el fenómeno registrando las posiciones en la cinta registradora. El registro de posiciones debe ser desde que el deslizador inicia su movimiento. Anote sus mediciones en una tabla de resultados.

c1. Conjuntee las mediciones propias y de los otros grupos de trabajo ( $k = 5$ ) en la tabla 2.

c2. Calcule los Valores Promedio de las  $Y$ 's para cada **i-renglón** de la tabla 2. Por ejemplo:

$$\text{Para el 1-renglón } \bar{Y}_1 = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Y_1$$

Anote los resultados en la tabla 2.

c3. Calcule la dispersión en cada **i-renglón** ( $\text{Disp}(Y_i)$ ).

$$\text{Para el 1-renglón: } \sigma_{Y_1}^2 = \frac{1}{5-1} \sum_{j=1}^5 (Y_1(j) - \bar{Y}_1)^2$$

En forma análoga efectúe los cálculos restantes, anote sus resultados en la tabla 2.



n	X <sub>i</sub>	Y <sub>i</sub> (1)	Y <sub>i</sub> (1)	Y <sub>i</sub> (1)	Y <sub>i</sub> (1)	Y <sub>i</sub> (1)	Y <sub>i</sub>	Disp(Y <sub>i</sub> )
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								

Tabla 2. Tabla de valores originales.

c4. Calcule el promedio general de las dispersiones en Y (Disp(Y)).

$$\sigma_Y^2 = \frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} \sigma_{Y_i}^2$$

4. Construya la gráfica de dispersión con las parejas de valores  $(X_i, Y_i)$ .
5. Interpretación analítica. - Con las parejas de valores  $(X_i, Y_i)$ , determine la línea de mejor ajuste  $Y = m \cdot X + b$ .
  - a) Calcule los valores ajustados  $\hat{Y}_i = m \cdot X_i + b$ . Anote sus resultados en la tabla 3.
  - b) Calcule  $(Y_i - \hat{Y}_i)^2$  para  $i = 1, \dots, n$ . Anote sus resultados en la tabla 3.

n	$X_i$	$\bar{Y}_i$	$\hat{Y}_i = m \cdot X_i + b^*$	$(\bar{Y}_i - \hat{Y}_i)^2$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				

Tabla 3. Tabla de valores calculados.

c) Calcule 
$$\sigma_{Ly}^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (\bar{Y}_i - \hat{Y}_i)^2$$

6. Utilice el criterio de c4 y c para demostrar que no existe una relación lineal entre las variables involucradas (**ver Apéndice B**).

### OBJETIVOS:

*Al finalizar el experimento el alumno:*

- ◇ *Podrá identificar la condición para utilizar una transformación Z*
- ◇ *Calculará los valores transformados.*
- ◇ *Determinará cuando existe una relación lineal entre valores de X & Z.*
- ◇ *Determinará una Ley Física No Lineal y sus implicaciones.*
- ◇ *Evaluará el experimento calculando el  $E_{exp}$ .*

### INTRODUCCIÓN TEÓRICA.

Cuando el criterio de Aceptación (C.A.) no se cumple, esto quiere decir que la aleatoriedad en la línea de mejor ajuste es demasiado grande para ser provocada (o explicada) por la aleatoriedad en la medición de la variable dependiente. Esto sucede posiblemente porque existe otro tipo de relación entre las cantidades físicas **X**, **Y** que no es lineal. El tipo de relación se puede observar en la gráfica de dispersión. Es posible también, que este criterio no se cumpla cuando el control del experimento es muy deficiente, es decir, que para un valor constante de la cantidad física independiente (**X<sub>i</sub>**) se obtienen valores de la variable dependiente muy diferentes, esto se puede detectar cuando el error aleatorio en el primer renglón

$\left( E.A_{y1} = \frac{\sqrt{\sigma_{y1}^2}}{n} \right)$  representa más del 50% del valor promedio de dicho renglón.

Para este tipo de análisis estadístico se considera que el control del experimento es adecuado y que la dispersión en la línea de mejor ajuste solo se puede explicar por la aleatoriedad en la cantidad física dependiente.

Por tanto, con el propósito de encontrar el tipo de relación que se observa entre las cantidades medidas y seguir aplicando los mismos criterios, a continuación se expondrá el procedimiento de la Transformación **Z** (ver Apéndice B).

### TRANSFORMACIÓN (Z).

En esta práctica se desarrolla el procedimiento para determinar los parámetros de la línea de mejor ajuste entre las variables originales cuando **no** satisface la desigualdad C.A. Este procedimiento consiste en linealizar la relación por medio de una transformación **Z** de los

valores de la variable dependiente. La forma de la transformación **Z** depende de la tendencia mostrada por las variables originales en la gráfica de dispersión o de las consideraciones experimentales del fenómeno.

Así por ejemplo, la transformación general del tipo  $Z = \frac{Y - Y_0}{X - X_0}$  se utiliza para linealizar una relación cuadrática del tipo  $Y = a_0 + a_1X + a_2X^2$ . De tal forma que al realizar una transformación inversa se podrá obtener la relación existente entre la variable original **Y** y la variable independiente **X**. Es evidente que si la información conjuntada corresponde a varias ejecuciones del fenómeno en condiciones muy diversas, la línea de mejor ajuste de los valores transformados no será aceptada aunque se utilice correctamente la transformación **Z**.

### TRANSFORMACIÓN **Z** = **Y/Z**.

En el análisis del movimiento de objetos, es conveniente utilizar pequeñas variantes de la transformación  $Z = \frac{Y - Y_0}{X - X_0}$ , dependiendo de la información disponible que se tenga del movimiento del objeto y de los supuestos iniciales del movimiento.

En el caso en que el proceso experimental permite adquirir información del movimiento de un móvil desde que inicia su movimiento (parte del reposo) y se cumple la condición de que en **X = 0.0 seg** la posición de la partícula **Y = 0.0 cm** y además no se satisface la desigualdad C.A. con los valores originales de las variables **X & Y**, entonces considere el procedimiento siguiente para determinar la Ley Física del fenómeno:

1. Aplicar la transformación **Z** = **Y/Z** a cada uno de los datos, para obtener valores de **Z** de cada pareja de valores (**X, Y**), como se muestra en la 4ª columna de la tabla 1.
2. Debido a que la cantidad física **Y<sub>i</sub>** del renglón **i-esimo** es una variable aleatoria, entonces la variable **Z<sub>i</sub> = Y<sub>i</sub>/X<sub>i</sub>** es también será una variable aleatoria. Por tanto, para calcular la dispersión en **Z** se utilizan los conceptos de **Propagación de Errores** de la forma siguiente:

$$\sigma_{Zi}^2 = \left( \frac{\partial (Y_i / Y_i)}{\partial Y_i} \right)_{x, \bar{y}}^2 * \sigma_{Yi}^2$$

Con la expresión anterior calcule la dispersión en cada renglón como muestra la tabla 1 y con estos valores se calcula la dispersión promedio de la variable **Z** mediante la expresión:

$$\sigma_Z^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_{Zi}^2$$

3. Repita el proceso de experimentación, considerando las parejas de valores de (**X**, **Z**). Es decir:
- Construya la gráfica de dispersión;
  - Interpretación analítica, determine la línea de mejor ajuste (**Z** = **m\*\*X + b\*\***).
  - Definición de la Ley Física, calcule la dispersión en la línea  $\sigma_{Lz}^2$  mediante la forma siguiente:

$$\sigma_{Lz}^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (Z_i - Z_i)^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (Z_i - m ** X_i - b **)^2$$

n	X <sub>i</sub>	Y <sub>i</sub>	Z <sub>i</sub> =Y <sub>i</sub> /X <sub>i</sub>	$\sigma_{Yi}^2$	$\sigma_{Zi}^2$
1	X <sub>1</sub>	Y <sub>i</sub>	Z <sub>1</sub> =Y <sub>1</sub> /X <sub>1</sub>	$\sigma_{Y1}^2$	$(1/X_1)^2 \sigma_{Z1}^2$
2	X <sub>2</sub>	Y <sub>i</sub>	Z <sub>2</sub> =Y <sub>2</sub> /X <sub>2</sub>	$\sigma_{Y2}^2$	$(1/X_2)^2 \sigma_{Z2}^2$
3	X <sub>3</sub>	Y <sub>i</sub>	Z <sub>3</sub> =Y <sub>3</sub> /X <sub>3</sub>	$\sigma_{Y3}^2$	$(1/X_3)^2 \sigma_{Z3}^2$
:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:
n	X <sub>n</sub>	Y <sub>n</sub>	Z <sub>n</sub> =Y <sub>n</sub> /X <sub>n</sub>	$\sigma_{Yn}^2$	$(1/X_n)^2 \sigma_{Zn}^2$

Tabla 1. Tabla de valores transformados.

Utilice los cálculos anteriores para verificar que la desigualdad 2.a se satisface, en cuyo caso se ha demostrado estadísticamente la existencia de una relación lineal entre las variables **X** & **Z**. Por lo contrario, cuando la desigualdad no se satisface, es conveniente hacer una revisión de los datos e inclusive realizar otras para la repetición de captura de datos.

$$\sigma_{Lz}^2 \leq (I.A.) * \sigma_z^2 \quad 2a$$

### LEY FÍSICA NO LINEAL.

Cuando se satisface la desigualdad 1.c se puede establecer, con un nivel de confianza del  $\alpha\%$ , que existe una relación lineal entre las variables **X** & **Z**, de la forma **Z** = **m\*\*X + b\*\***. Esto indica que en la inspección estadística, los valores transformados presentan una tendencia lineal, junto a la inspección visual y a la aleatoriedad de los valores, se concluye que existe una relación lineal entre los valores transformados (**X,Z**) (ver Apéndice B).

Es importante aclarar que la transformación **Z** se utilizó sólo como un artificio matemático para demostrar que existe una relación entre las variables **X** & **Z**, pero el verdadero interés es encon-

trar una relación entre las variables originales **X** & **Y**. Esta relación entre las variables originales es posible obtenerla realizando una transformación inversa en los términos siguientes: Si **Z** es igual a **Y/X**, entonces se puede sustituir en la relación lineal **Z = m\*\*X - b\*\***, obteniéndose la relación entre **X** & **Y** de la forma: **Y = m\*\*X<sup>2</sup> + b\*\*X**.

Se dice que la relación anterior se puede considerar como una **LEY FÍSICA** porque representa adecuadamente el comportamiento del fenómeno respecto a las cantidades físicas que representan las variables **X** & **Y**. Se puede observar que la Ley Física tiene un exponente 2 en la variable **X**, por eso se dice que esta expresión es una Ley Física No Lineal.

La comprobación de resultados o la evaluación del experimento se hace mediante la primera y segunda derivada de la posición (**Y**) con respecto al tiempo (**X**) y de esta forma determinar la Aceleración Experimental (**a<sub>EXP</sub>**). Con este valor calculado es posible evaluar el experimento, utilizando el cálculo del Error en el Experimento (**E<sub>EXP</sub>**) utilizando el valor de la aceleración del móvil (**a<sub>TEO</sub>**) considerando que el movimiento del móvil se realiza en forma ideal.

$$E_{\text{exp}} = \left| \frac{a_{\text{teo}} - a_{\text{exp}}}{a_{\text{teo}}} \right| * 100\%$$

### ANÁLISIS DE DATOS.

Los datos que se analizarán serán datos capturados para el fenómeno del experimento anterior, es decir, para el fenómeno del **Movimiento Rectilíneo de un Móvil sobre un Plano Inclinado**, de tal forma que copie los datos (**X<sub>i</sub>**, **Y<sub>i</sub>**, **Disp (Y<sub>i</sub>)**) de dicho experimento en la tabla 2 y desarrolle los pasos siguientes:

1. Aplique la transformación **Z = Y/X** a cada uno de los datos contenidos en la tabla de resultados para obtener los valores de **Z** para cada pareja de valores de (**X**, **Y**). Anote sus resultados en la tabla 2.

n	$X_i$	$\bar{Y}_i$	$Z_i = \bar{Y}_i / X_i$	$\sigma_{Yi}^2$	$\sigma_{Zi}^2$
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					

Tabla 2. Tabla de valores transformados.

2. Debido a que la cantidad física  $Y_i$  del renglón **i-esimo** es una variable aleatoria, entonces la variable  $Z_i = \bar{Y}_i / X_i$  es también una variable aleatorio. Por tanto, para calcular la varianza en **Z** resulta:

$$\sigma_{Zi}^2 = \left( \frac{1}{X_i} \right)^2 * \sigma_{Yi}^2$$

Con la expresión anterior, calcule la dispersión en cada renglón. Anote sus resultados en la tabla 2 y con estos valores se calcula la dispersión promedio de la variable **Z**.

3. Copie los valores de ( $X_i$  ,  $Z_i$ ) de la tabla 2 en la tabla 3 y construya la gráfica de dispersión con las parejas de valores ( $X_i$  ,  $Z_i$ ).
4. Interpretación analítica.- Con las parejas de valores ( $X_i$  ,  $Z_i$ ), determine la línea de mejor ajuste  $Z = m^{**}X + b^{**}$ .

n	$X_i$	$Z_i$	$\hat{Z}_i = m^{**}X_i + b^{**}$	$(Z_i - \hat{Z}_i)^2$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				

Tabla 3. Tabla de valores calculados.

- 4a. Calcule los valores ajustados  $\hat{Z}_i = m^{**}X_i + b^{**}$ . Anote sus resultados en la tabla 3.
- 4b. Calcule  $(Z_i - \hat{Z}_i)^2$  para  $i = 1, \dots, n$ . Anote sus resultados en la tabla 3.
- 4c. Calcule  $\sigma_{Lz}^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (Z_i - \hat{Z}_i)^2$
5. Utilice la desigualdad **2.a.** en el caso de que se satisfaga la desigualdad, entonces se puede establecer:  $Z = m^{**}X + b^{**}$ , pero  $Z = Y/X$ , entonces la Ley Física resulta ser:  $Y = m^{**}X^2 + b^{**}X$ . Continúe al paso 6. En caso de que **no** satisfaga la desigualdad **2.a.**, será necesario revisar los datos conjuntados, posiblemente presentan variaciones en sus primeros valores mayores al 50% del valor promedio.
6. Como consecuencia realice la comprobación de resultados, obteniendo la aceleración experimental del móvil y determine la aceptación o el rechazo de la hipótesis que se planteó en el experimento anterior. Así también, determine el Error Experimental utilizando el valor de la aceleración experimental y el valor de la aceleración teórica del móvil sobre un plano inclinado.



$$\text{Error en el Experimento} = E_{\text{exp}} = \left| \frac{a_{\text{teo}} - a_{\text{exp}}}{a_{\text{teo}}} \right| * 100 \%$$



## MOVIMIENTO UNIFORMEMENTE ACELERADO

### OBJETIVO GENERAL:

- ◇ Se determinará el modelo matemático que representa el movimiento de un objeto que se desplaza sobre un riel de colchón de aire y que recorre distancias diferentes para tiempos iguales; así como ecuaciones que se derivan del mismo.

### OBJETIVOS ESPECIFICOS.

- ◇ Que el alumno interactúe directamente con equipo y materiales utilizados en la Física Experimental al participar en la conexión de los equipos utilizados en el experimento.
- ◇ Con ayuda de la PC el alumno medirá indirectamente distancias y tiempos en el movimiento de un deslizador.
- ◇ Utilizando técnicas de análisis de datos, se describirán y analizarán gráficamente las mediciones obtenidas acorde al sistema internacional de unidades.
- ◇ Mediante el análisis de las gráficas de funciones de variable real se seleccionará la función que mejor se adapte a la gráfica de los datos experimentales; determinándose el valor de las constantes que aparecen en la función.
- ◇ Se evaluará la factibilidad del modelo matemático que representa la ley física del experimento en cuestión.

## INTRODUCCIÓN TEÓRICA.

En el espacio se observan movimientos de objetos desde algún sistema de referencia, tales como el movimiento de automóviles en una dos y tres dimensiones, movimiento de aves, aviones, helicópteros; así como el movimiento de los planetas que integran nuestro sistema solar o en general el movimiento de los astros en el Universo. Es indudable que el movimiento de estos objetos, en cada caso puede ser diferente dependiendo de algunas de las características físicas de los mismos: tales como el medio donde se efectúa el movimiento; debido a ello en la descripción y análisis del movimiento de los objetos, se ha hecho una clasificación, siendo uno de ellos el movimiento uniforme, que se caracteriza por que los objetos se mueven con velocidad constante; o sea que este tipo de movimiento lo realizan objetos que se mueven en una sola dimensión.

Es recomendable remarcar que en este caso también la rapidez es constante y como por definición la aceleración  $\vec{a}$  de un objeto que se mueve en algún lugar del espacio es el cambio de la velocidad en el tiempo; por lo que para este tipo de movimiento la aceleración es cero.

Asimismo es recomendable aclarar que la velocidad de un objeto que se mueve en el espa-



cio se define como el cambio de la función que representa el desplazamiento, en el tiempo; por lo que si  $\vec{r}(t)$  representa la posición del objeto para cualquier tiempo mayor que cero y  $\vec{r}_0$  la posición inicial, entonces se encuentra que:  $\vec{r}(t) = \vec{r}_0 + \vec{v} t$

Analizando el movimiento de los objetos en el espacio se concluye que la mayoría de éstos no se mueven con velocidad constante; para esto es suficiente observar la trayectoria que siguen los objetos, que normalmente es una curva en el espacio; o sea que para la mayor parte del movimiento de los objetos la velocidad es variable en el tiempo; por lo que la aceleración de dichos objetos es diferente de cero, en cuyo caso la aceleración puede ser constante. Por definición a este tipo de movimiento se le llama **movimiento uniformemente acelerado**, remarcando que esta definición es clásicamente para sistemas inerciales.

#### **INSTRUMENTOS Y MATERIALES.** (Equipo marca Leybold).

- ⇒ Un riel de colchón de aire.
- ⇒ Un deslizador tipo Leybold.
- ⇒ Un transductor.
- ⇒ Un electroimán.
- ⇒ Una Videocom.
- ⇒ Un compresor (generador de aire) con manguera.
- ⇒ Una fuente de corriente continua de 0 a 12V.
- ⇒ Accesorios para el deslizador.
- ⇒ Una PC con sistema operativo DOS o WINDOWS.
- ⇒ Algunos otros cables de conexión que se utilizan en el experimento.
- ⇒ Un Vernier.

#### **DESARROLLO DEL EXPERIMENTO.**

1. Arma el circuito que indica la figura. (**No energizar**)
  - a) Coloque la cámara de frente al riel de colchón de aire a una distancia de 1m.
  - b) Ajuste el lente de la cámara con un diafragma 16.
  - c) Calibre el riel de colchón de aire para que este al nivel de la mesa o superficie.

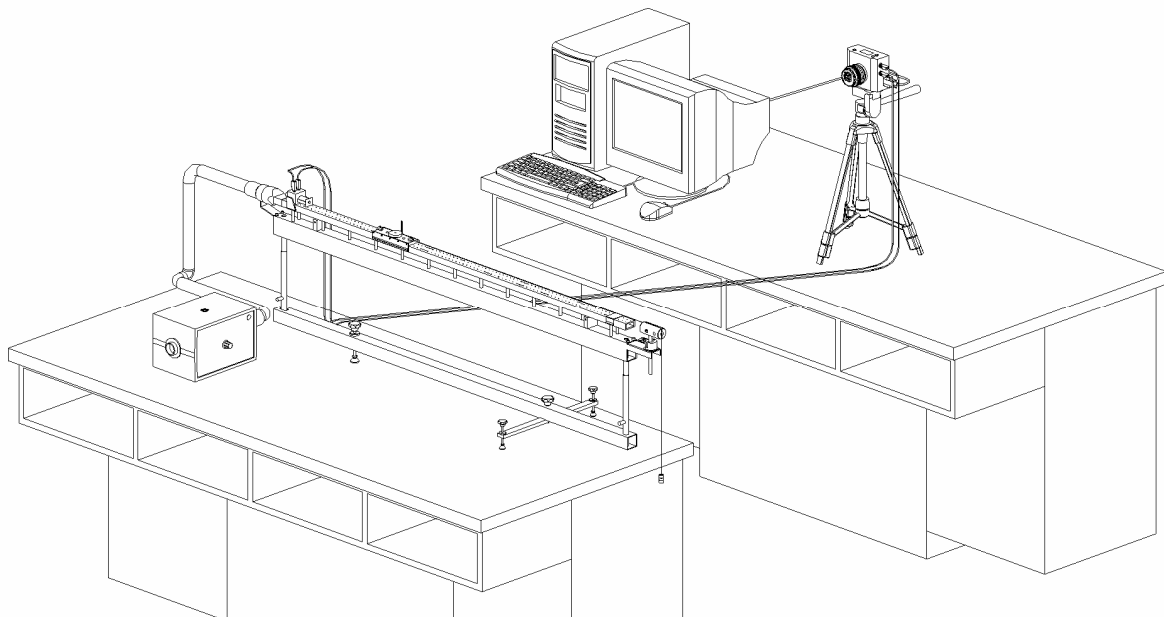


Figura. Movimiento Uniformemente Acelerado (Videocom )

2. Encienda la PC.
3. Ir a inicio, programas, videocom, videocom.Movimientos ↵.
4. Dentro del software nos ubicamos en la opción de recorrido y damos un **click**.
5. Damos un **click** sobre el icono que se llama “Ajustes/Calibración” del recorrido.
6. Estando dentro de “Ajustes/Calibración” del recorrido damos un **click** en la opción de “Predeterminados”.
  - a) Estando en “Predeterminados” vamos a cambiar valores a dos parámetros. El primero es después de tiempo prefijado y le damos 3 seg.
  - b) En el segundo parámetro que es al recorrer la distancia, le damos un valor de 1m. Damos ↵ para que acepte los cambios que hicimos.
7. Después damos otro **click** sobre el mismo icono de “Ajustes/Calibración” del recorrido.
8. Ya estando dentro, damos un **click** en la opción de “Calibración” del recorrido.
  - a) En esta opción cambiaremos los valores de la 1ª y 2ª posición, en la primera el valor será 1 y en la segunda posición 0, en ese mismo cuadro activamos “emplear calibración” y damos ↵.
9. Antes de que se inicie el recorrido debe estar bien calibrado el deslizador sobre la regla que tiene el software, el cursor debe estar precisamente en cero (0) para que tenga una mejor precisión del recorrido.
10. Para iniciar el recorrido damos un **click** en el icono que tiene un cronómetro, al icono se le llama “iniciar/detener” medición.

- a) En la opción de “recorrido” nos muestra su gráfica y sus valores.
  - b) Para que muestre la velocidad damos un **click** en la opción de “velocidad”. En esta opción se mostrará la gráfica de velocidad y sus valores.
  - c) Para que nos muestre la aceleración, damos **click** en la opción de “aceleración”. En esta se mostrará la gráfica de aceleración y sus valores.
11. Repetir el inciso (10) cinco veces para ver y analizar la aleatoriedad del fenómeno.

## OBJETIVOS:

- ◇ Al finalizar el experimento el alumno:
- ◇ Podrá identificar la condición para utilizar la transformación  $Z = Y - Y_0/X - X_0$ .
- ◇ Calculará los valores transformados.
- ◇ Determinará cuando existe una relación lineal entre valores de  $X$  &  $Z$ .
- ◇ Determinará una Ley Física No Lineal y sus implicaciones.
- ◇ Evaluará el experimento calculando el Error Experimental.

## INTRODUCCIÓN TEÓRICA.

Uno de los sistemas mecánico de masa-cuerda que se analizan más comúnmente en todo curso de mecánica clásica es el sistema llamado Máquina de Atwood, este consiste en dos bloques de masa  $m_1$  y  $m_2$  unidos por una cuerda que se considera de masa insignificante e indeformable. Dicha cuerda pasa a través de una polea considerada también de masa insignificante para formar el sistema mostrado en la figura 1.

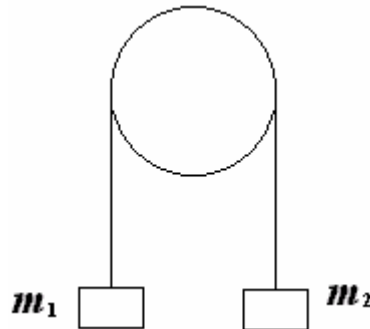


Figura 1. Máquina de Atwood.

Para analizar este sistema, se construyen los diagramas de un cuerpo libre de cada uno de los bloques como indica la figura 2.



a) Para el bloque de masa  $m_1$

b) Para el bloque de masa  $m_2$

Figura 2. Diagramas de Cuerpo Libre de los Bloques

Referente a la figura 2(a) se puede establecer la 2ª ley de Newton para el bloque de masa  $m_1$  como sigue:

$$\sum F (\text{actúan sobre } m_1) = m_1 \bar{a}_1$$

$$\vec{T} + m_1 \vec{g} = m_1 \vec{a}_1$$

Dado que estas fuerzas no tienen componentes horizontales, entonces sus componentes verticales resultan como sigue:

$$T_1 - m_1 g = m_1 a_1 \quad \dots\dots\dots \text{Ec. 1}$$

En forma similar para el bloque de masa  $m_2$  se tiene:

$$\sum F (\text{actúan sobre } m_2) = m_2 \bar{a}_2$$

$$\vec{T}_2 + m_2 \vec{g} = m_2 \vec{a}_2$$

En componentes verticales se tiene:

$$T_2 - m_2 g = -m_2 a_2 \quad \dots\dots\dots \text{Ec. 2}$$

Al considerar que las masas de la cuerda y de la polea son insignificantes comparadas con la masa de bloques, entonces se tiene que las tensiones en sus extremos  $T_1$  y  $T_2$  son iguales, ( $T_1 = T_2 = T$ ). Además, como la cuerda es indeformable, se tiene que  $a_1$  y  $a_2$  son iguales ( $a_1 = a_2 = a$ ) en magnitud pero de sentidos contrarios, por tanto las ecuaciones Ec.1 y Ec.2 resultan:

$$T - m_1 g = m_1 a \quad \dots\dots\dots \text{Ec. 3}$$

$$T - m_2 g = -m_2 a \quad \dots\dots\dots \text{Ec. 4}$$

Despejando **T** de la ecuación Ec.3:  $T = m_1a + m_1g$  y sustituyendo en la Ec.4, se tiene:

$$m_1a + m_1g - m_2g = -m_2a$$

$$m_1a + m_2a = m_2g - m_1g$$

$$(m_1 + m_2)a = (m_2 - m_1)g$$

$$a = \frac{(m_2 - m_1)g}{m_1 + m_2}$$

A esta aceleración la denotaremos como  $a_{ESP}$ , ya que **s** es la aceleración de los bloques cuando se analiza a la máquina de Atwood en condiciones ideales.

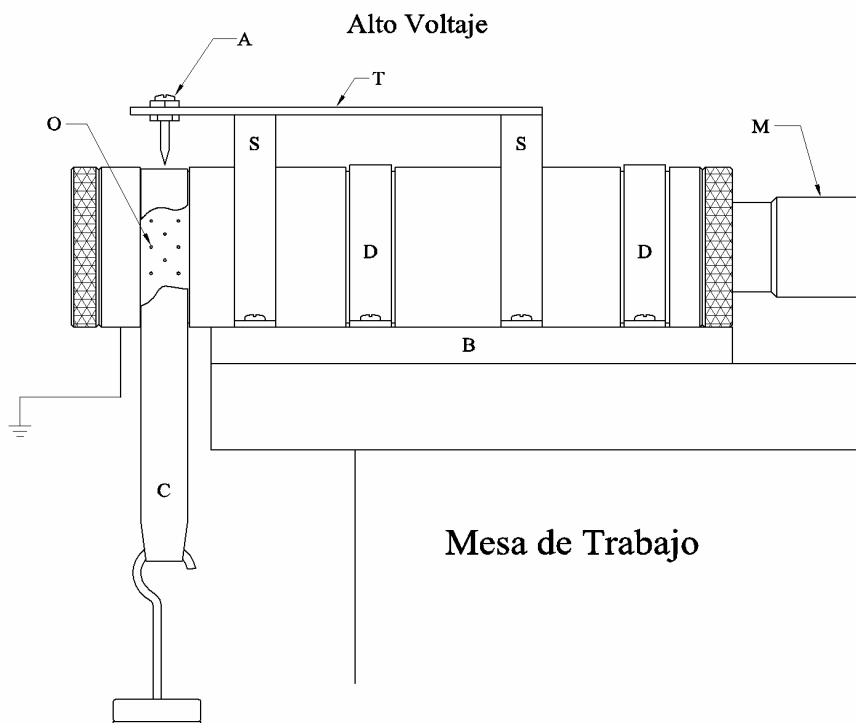
#### **MATERIAL A UTILIZAR:**

- ⇒ 2 prensas de mesa.
- ⇒ 2 sujetadores tipo soporte.
- ⇒ 1 polea de “aire”.
- ⇒ 1 generador de chispas.
- ⇒ 1 compresor con manguera.
- ⇒ 1 cinta registradora de chispas.
- ⇒ 2 porta pesas.
- ⇒ 4 pesas de 50 gr.
- ⇒ 1 marco de pesas.
- ⇒ 1 balanza de Pascal.
- ⇒ 1 calibrador vernier.
- ⇒ 1 tira de maskin-tape.

#### **DESARROLLO EXPERIMENTAL.**

1. Empleando las prensas de mesa, ensamble el dispositivo como muestra la figura 3.
2. Conecte la manguera del compresor a la polea y el generador de chispas.





<b>A:</b> Aguja de alto voltaje.	<b>B:</b> Base de madera.	<b>C:</b> Cinta de papel grafitado.
<b>D:</b> Cinchos de sujeción.	<b>E:</b> Entrada de aire.	<b>M:</b> Manguera de entrada de aire.
<b>O:</b> Orificios de salida de aire.	<b>S:</b> Soporte.	<b>T:</b> Tira de acrílico.

Figura 3. Máquina de Atwood (rediseño del Dr. Apolonio Gallegos de la Cruz, DEPI 940631)

3. Corte un tramo de cinta registradora de aproximadamente de 1.0m y haga un doblez en cada uno de los extremos.
4. Coloque la cinta sobre la polea en su parte central de tal modo que uno quede en la parte superior y el otro sin tocar el piso, colocando en cada extremo las pesas. Se recomienda usar bloques de masas de 50gr y 70gr respectivamente.
5. Seleccione la frecuencia de 30 Hz (o 20 Hz) y manteniendo oprimido el botón de disparo del generador, ponga a funcionar el compresor de tal modo, que al llegar uno de los objetos a la altura de la polea deje de accionar el interruptor del generador.
6. Apague el compresor y el generador. Retire la cinta registradora, quitando las pesas de sus extremos.
7. Basándose en la observación del movimiento de los bloques, formule una hipótesis referente al tipo de movimiento que se desarrolla.

### ANÁLISIS DE DATOS.

Desarrolle el proceso de Experimentación en sus siete pasos para verificar la hipótesis planteada, mediante el orden siguiente:

1. Considere las cantidades físicas directas del fenómeno: **desplazamiento de los bloques y el tiempo.**
2. Considere al tiempo como la cantidad física independiente (**X**), y como cantidad física dependiente (**Y**) al desplazamiento de los bloques.

Para analizar este fenómeno, conjunte la información obtenida por los cinco grupos de trabajo y reúna los resultados de tiempos y posiciones de una forma homogénea, para esto, coloque la cinta registradora sobre la mesa de trabajo y haga lo siguiente:

$X_i =$              $X_0$              $1 / f + X_0$              $2 / f + X_0$              $3 / f + X_0 \dots$             etc.

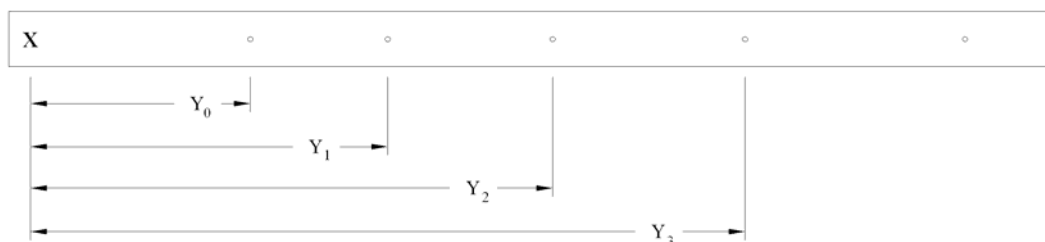


Figura 4. Cinta registradora de datos para la máquina de Atwood.

Considere un punto a 5.0cm del inicio del movimiento. Este punto será el punto de origen de las posiciones. Desde este punto trace una línea de aproximadamente 5.0cm, la longitud de la línea lo debe definir la marca más cercana a los 5.0cm, denótela como **Y<sub>0</sub>**. A esta marca, se le asocia un tiempo **X<sub>0</sub>** que puede ser entre **2/30seg** y **4/30seg**. El tiempo asociado debe ser el mismo para todos los grupos de trabajo (ver figura 4).

La forma de tomar los datos del movimiento de los bloques es un ejemplo de elección arbitraria de los puntos de origen de tiempos y posición. Para el punto de origen de

posición se eligió un punto colocado aproximadamente a 5.0cm y para el origen del tiempo se eligió un tiempo inicial de **2/30seg**. Ante estas condiciones, la posibilidad de analizar este movimiento en forma semejante, como se analizó el movimiento de la práctica anterior, será posible siempre y cuando la transformación **Z** sea de la forma **Z = Y – Yo/ X – Xo**.

3. Con los valores asignados de **Xo**, **Yo** (los mismos valores para cada grupo de trabajo), haga el llenado de la tabla de valores en la tabla 1.

n	X <sub>1</sub>	Y <sub>i</sub> (1)	Y <sub>i</sub> (2)	Y <sub>i</sub> (3)	Y <sub>i</sub> (4)	Y <sub>i</sub> (5)	$\bar{Y}_i$	Disp(Y <sub>i</sub> )
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								

Tabla 1. Tabla de valores originales.

- a) Calcule los valores promedio de las **Y's** para cada i-renglón de la tabla 1. Por ejemplo:

Para el 1 – Renglón:  $\bar{Y}_i = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 Y_1$  Anote los resultados en la tabla 1.

- b) Calcule la dispersión en cada i-renglón (**Disp(Y<sub>i</sub>)**).

Para el 1 – Renglón:  $Disp(Y_i) = \frac{1}{5-1} \sum_{j=1}^5 (Y_1(j) - \bar{Y}_1)^2$  en forma análoga efectúe los cálculos para los renglones restantes y anote sus resultados en la tabla 1.

- c) Calcule el promedio general de las dispersiones en **Y (Disp(y))**.

$$Disp(Y) = \frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} Disp(Y_i)$$

4. Copie los valores de  $(X_i, \bar{Y}_i)$  de la tabla 1 a la tabla 2. Construya la gráfica de dispersión con las parejas de valores  $(X_i, \bar{Y}_i)$ .

n	$X_i$	$\bar{Y}_i$	$\hat{Y}_i = m * X_i + b *$	$(\bar{Y}_i - \hat{Y}_i)^2$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				

Tabla 2. Tabla de valores calculados.

5. Interpretación Analítica. Con las parejas de valores  $(X_i, \bar{Y}_i)$ , determine la línea de mejor ajuste  $Y = m * X + b *$ .

- a) Calcule los valores ajustados  $\hat{Y}_i = m * X_i + b *$ . Anote sus resultados en la tabla 2.  
b) Calcule  $(\bar{Y}_i - \hat{Y}_i)^2$  para  $i = 1, \dots, n$ . Anote sus resultados en la tabla 2.

a) Calcule  $Disp(L) = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (\bar{Y}_i - \hat{Y}_i)^2$

6. Determine si la línea de mejor ajuste se considera como Ley Física del fenómeno utilizando el criterio de aceptación para los valores de Y en los términos siguientes:

$$Disp(L) \leq (1.887) * Disp(Y) \dots \dots \dots C.A.$$

En caso que se satisfaga la desigualdad continúe con el paso 7; en caso contrario continúe con los pasos siguientes:

a) Copie los valores de  $(X_i, \bar{Y}_i)$  de la tabla 2 a la tabla 3. Aplique la transfor-

mación  $Z = \frac{Y - Y_0}{X - X_0}$  a cada uno de los datos contenidos en la tabla 3 (excepto para el primer valor), obteniéndose valores de  $Z$  para cada pareja de valores de  $(X_i, \bar{Y}_i)$ .

b) Debido a que la cantidad física  $Y_i$  del renglón **i-esimo** es una variable aleatoria, entonces la variable  $Z_i$  es también una variable aleatoria. Por tanto, para calcular la dispersión en  $Z$  se utilizan los conceptos expuestos en el tema de propagación de errores de la forma siguiente:

$$Disp(Z_i) = \left( \frac{\partial(Y_i - Y_0 / X_i - X_0)}{\partial Y_i} \right)_{x,y}^2 * Disp(Y_i) = \left( \frac{1}{X_i - X_0} \right)^2 * Disp(Y_i)$$

Con la expresión anterior se calcula la dispersión en cada renglón como muestra la tabla 3 y con estos valores se calcula la dispersión promedio de la variable  $Z$  mediante la expresión:

$$Disp(Y) = \frac{1}{14} \sum_{i=1}^{14} Disp(Z_i)$$

c) Con la tabla 3 se repite el proceso considerando las parejas de valores de  $(X, Z)$  en el orden siguiente.

d) Copie los valores  $(X_i, Z_i)$  de la tabla 3 a la tabla 4. Construya la gráfica de dispersión con las parejas de valores  $(X_i, Z_i)$ .

<b>n</b>	<b>X<sub>i</sub></b>	<b>Y<sub>i</sub></b>	<b><math>Z = \frac{Y - Y_0}{X - X_0}</math></b>	<b>Disp(Y<sub>i</sub>)</b>	<b>Disp(Z<sub>i</sub>)</b>
1	X <sub>0</sub> =	Y <sub>0</sub> =			
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					

Tabla 4. Tabla de valores transformados.

- d1) Interpretación Analítica. Con las parejas de valores (**X<sub>i</sub>** , **Z<sub>i</sub>**), determine la línea de mejor ajuste **Z = m\*\*X + b\*\***.
- d2) Calcule los valores ajustados  **$\hat{Z}_i = m^{**}X_i + b^{**}$** . Anote sus resultados en la tabla 5.
- d3) Calcule  **$Disp(L_z) = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (Z_i - \hat{Z}_i)^2$**
- e) Defina la ley física del fenómeno utilizando el criterio de aceptación para los valores de **Z** en los términos siguientes:

$$Disp(L) \leq (1.930) Disp(Z) \dots\dots\dots C.A.$$

(El índice de aceptación de 1.930 es el correspondiente a **n = 14** y **k = 5**)

En el caso de que se satisfaga la desigualdad anterior, entonces se puede establecer **Z = m\*\*X + b\*\***, pero **Z = Y - Y<sub>0</sub> / X - X<sub>0</sub>**, entonces la Ley Física es: **Y = m\*\*X<sup>2</sup> + (b\*\* - mX<sub>0</sub>)X + Y<sub>0</sub> - b\*\*X<sub>0</sub>**. Continué al paso 7. En caso de que **no** se satisfaga la desigualdad será necesario revisar los datos conjuntados, posiblemente-

te presentan variaciones en sus primeros valores mayores al 50% del valor promedio.

n	$X_i$	$Z_i$	$\hat{Z}_i = m^{**}X_i + b^{**}$	$(Z_i - \hat{Z}_i)^2$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				

Tabla 5. Tabla de valores calculados.

- Como consecuencia realice la comprobación de resultados, obteniendo la aceleración experimental de los bloques y determine la aceptación o el rechazo de la hipótesis planteada. Así también, determine el Error Experimental utilizando el valor de la aceleración experimental y el valor de la aceleración teórica de los bloques en la máquina de Atwood.

$$\text{Error en el Experimento} = E_{\text{exp}} = \left| \frac{a_{\text{teo}} - a_{\text{exp}}}{a_{\text{exp}}} \right| * 100\%$$

### INTRODUCCIÓN TEÓRICA.

Después del estudio de la cinemática y la dinámica del punto material, el movimiento de rotación pura, de un cuerpo considerado rígido alrededor de un eje, o el de rodadura considerando por ejemplo la traslación del eje de giro en forma paralela a sí misma, son, en principio, de análisis simple. De hecho el movimiento de “un punto” marcado en el cuerpo en estudio en cualquiera de los casos, se reducirá esencialmente a un movimiento circular o bien a un movimiento en que todo instante será formado por una rotación más una traslación. Así pues y con las características señaladas, en el sentido dinámico del problema toda fuerza cuya dirección no pase por el eje de giro producirá un efecto de rotación. El análisis dinámico se reduce a la ecuación de movimiento generada por la segunda ley de Newton con estas consideraciones:

$$\mathbf{F} = \mathbf{M}\mathbf{a} \dots\dots\dots (1) \qquad \tau = I \alpha \dots\dots\dots(2)$$

Es decir, la fuerza como una propiedad de inercia veces la aceleración correspondiente. El carácter vectorial de estas ecuaciones es simple. En la segunda ecuación torque y momento de inercia se calculan respecto a un punto común, usualmente contenido en un eje de giro y por supuesto  $\mathbf{a}$  es la aceleración del centro de masa. Como ecuaciones auxiliares tendremos las relaciones entre las cantidades cinemáticas angulares y lineales y en forma más específica, relaciones del tipo de fricción y por supuesto, en su caso, la condición de no resbalamiento.

Podemos alcanzar una buena comprensión de lo anterior si aplicamos las ecuaciones de movimiento (1) y (2) a la situación descrita en la figura 1, en la cual se muestra un cuerpo rígido, bajo la acción de una fuerza externa  $\mathbf{F}$  horizontal, aplicada a una distancia  $\mathbf{C}$ , produciéndose un movimiento supuesto sin resbalamiento y se muestran las otras fuerzas pertinentes.



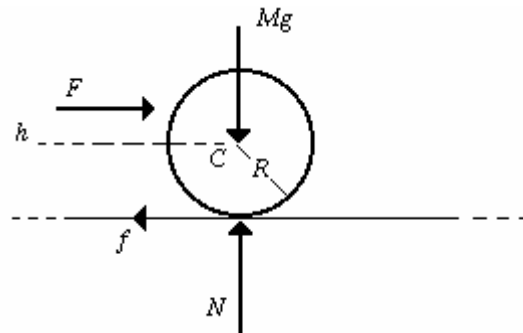


Figura N° 1

### EQUIPO Y MATERIAL.

- ⇒ 1 riel adaptado para rodadura.
- ⇒ 1 reloj contador digital.
- ⇒ 1 generador de chispas.
- ⇒ 1 rueda embalada.
- ⇒ Bases en A, varillas y prensas.
- ⇒ 1 porta pesas corto.
- ⇒ 1 porta pesas largo.
- ⇒ 2 pesas de 50gr.
- ⇒ 1 rollo de papel registrador.
- ⇒ 2 balines de acero.
- ⇒ 1 flexómetro.
- ⇒ 1 calibrador pie de rey.
- ⇒ 1 balanza y marco de pesas grande.
- ⇒ 1 dinamómetro.

**Montaje:** en la presente práctica se desarrollarán dos experiencias mostradas en las figuras 2 y 3:

- a) Rotación pura y
- b) Movimiento de rodadura.

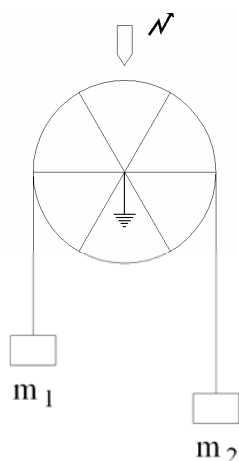


Figura 2.

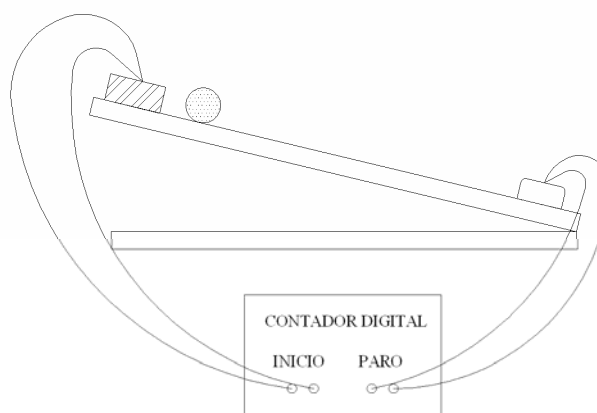


Figura 3.

1. Usando las dos bases en A y varillas verticales y horizontales con las prensas-guías, suspenda la rueda de bicicleta contenida en un plano vertical y que gire libremente. Conecte el eje de la misma a la terminal tierra del generador de chispas. Con otro montaje similar suspenda la terminal alto voltaje, por ejemplo sobre la rueda de bicicleta y conéctela consecuentemente al generador de chispas. Con una longitud adecuada de cinta registradora pase sobre la rueda y sujete a los extremos los portapesas con las pesas.
2. Conecte las terminales de la bobina de sujeción a la alimentación adecuada, (no mostrado en la figura). Conecte las terminales de inicio y paro a los bornes adecuados del contador digital.

## GUÍA DE REALIZACIÓN DEL EXPERIMENTO:

### Experimento (a).

Lograr que la cinta arrastre a la rueda sin resbalar sobre esta. Asegurado lo anterior, y partiendo del reposo elegir, experimentando, la frecuencia adecuada para lograr un cierto número de puntos experimentales, que tomaremos, por ejemplo, entre 10 y 15. Se deja a la posibilidad de tiempo y al gusto el repetir controladamente “la corrida del experimento” al menos 3 veces. Considere medir el radio de la rueda y su masa.

### Experimento (b).

En este experimento fijaremos un ángulo al riel y la forma de experimentación consistirá en

controlar distancias fijas entre el conmutador de arranque y el de paro obteniendo muestras de valores del tiempo en que recorre dicha distancia fija por el balón elegido. Deberemos elegir las distancias fijas variando, se sugiere, en cantidades iguales esta para lograr obtener por ejemplo 15 posibles distancias. La repetición se deja a elección del experimentador, no siendo menor de 3 repeticiones. Considere medir el radio del balón así como su masa.

## ELEMENTOS DE ANÁLISIS DEL EXPERIMENTO.

### Experimento (a).

1. Anotados nuestros datos en la forma convencional:  $1 = 1, 2, \dots, M$  ;  $K = 1, 2, \dots, N$  y realizando un gráfico de dispersión acorde a la propuesta de correlación  $Y = Y(X)$ , proponer por ejemplo la correlación  $Y = mX + b$ . Por el método de mínimos cuadrados, calcular  $m^*$  y  $b^*$  para la recta más próxima a los  $M \times N$  puntos experimentales. Así:  $Y^R = m^*X + b^*$ . Graficarla en el gráfico. Anotar en la tabla todos los cálculos señalados. Notas:  $Y_i$  es la medida de los valores de  $Y$  en  $i$  fijo. En este caso  $M = 15$  y  $N = 3$ .

$i / k$	$X_i$ (s)	$Y_i$ (1) (cm)	$Y_i$ (2) (cm)	$Y_i$ (3) (cm)	$Y_i$ (cm)	$\sum_K (Y_i(k) - Y_i)^2$	grados de libertad
1							2
2							2
3							2
4							2
5							2
6							2
7							2
8							2
9							2
10							2
11							2
12							2
13							2
14							2
15							2

2. Es claro que  $(Y_i(k) - Y_i^R) = (Y_i(k) - Y_i) - (Y_i^R - Y_i)$ , lo interesante en esta expresión es que si elevamos al cuadrado ambos miembros y sumamos respecto a todo valor de  $i$  &  $k$ , se puede demostrar que:

$$\sum_i \sum_k (Y_i(k) - Y_i^R)^2 = \sum_i \sum_k (Y_i(k) - Y_i)^2 + n \sum_i (Y_i^R - Y_i)^2 \dots\dots\dots (3)$$

Puesto que el lado izquierdo de esta expresión representa la suma de cuadrados de los errores con  $N \times M - 2$  grados de libertad, entonces apreciamos que esto lo descomponemos en por un lado (primero término del miembro derecho) una suma de cuadrados de “error puro” proveniente de los puntos repetidos con  $M(N-1)$  grados de libertad que genera  $S_e^2$  que reconoceremos como media cuadrática debida a error punto y por otro lado (segundo término del miembro derecho) una suma de cuadrados de “pérdida de ajuste” obtenida por sustracción de grados de libertad de los errores menos grados de libertad del error puro, es decir  $(N \times M - 2) - M(N-1) = M - 2$  grados de libertad que genera una media cuadrática de pérdida de ajuste que denotaremos por  $MS_p$ .

Así pues:  $S_e^2 = \sum_i \sum_k (Y_i(k) - Y_i)^2 / M(N-1) \dots\dots (4)$  y  $MS_p = n \sum_i (Y_i^R - Y_i)^2 / M - 2 \dots\dots (5)$

Podemos emplear esto en forma importante:  $S_e^2$  es un estimador de la desviación cuadrática media al cuadrado  $\sigma^2$ , varianza, cantidad no calculable, pero más importante es señalar que  $MS_p$  estima a  $\sigma^2$  *si el modelo es correcto* y estima a  $\sigma^2$  más términos de carácter sistemático si el modelo no es correcto. Esto sugiere el siguiente procedimiento.

Calcular el valor empírico  $F = MS_p / S_e^2$  con un punto  $100(1 - \sigma)\%$  de la distribución teórica de Fisher  $F$  con grado de libertad  $M - 2$  y  $M(N-1)$ . Así si la razón  $F$  es significativa, pérdida de ajuste, indica que el modelo es inadecuado aquí se sugiere revisar el experimento o abandonar el modelo, cualquier cálculo de intervalos de confianza será erróneo. Si la razón  $F$  no es significativa, en particular  $F < 1$ , no hay razón en este sentido para dudar del modelo y se podrá continuar con los elementos indicados más adelante.

Realice todo lo conducente para este objetivo.

3. Si el modelo es rechazado en el sentido visto, entonces se podrá argumentar con soporte extra en el campo del conocimiento, Física, la posibilidad de introducir un modelo por ejemplo y quizás, cuadrático de la forma  $Y = a + bX + cX^2$  que bajo la transformación  $Z = (Y - a)/X$  adquiere forma lineal  $Z = m^{**}X + b^{**}$  y usted puede dar el valor por ejemplo de cero, bajo condiciones adecuadas aunque siendo esta una suposición considerada como muy fuerte. Esto deberá realizarlo de cualquier forma, por el carácter del experimento.

Por supuesto existe forma de realizar esto sin necesidad de dicha suposición. Realice todos los pasos conducentes para esto y si es aceptado concluya con la aceptación de esta relación, una vez realizada la transformación inversa, como ley física del experimento y efectúe lo conducente a lo siguiente.

Si el modelo es aceptado olvide la forma específica de la tabla de datos y considerando que tiene usted **NxM** puntos experimentales, calcule ahora el valor empírico de  $F_E^* = MS_R / S^2$  y compárelo contra el teórico, por ejemplo, de **F(1, NM - 2, 95%)**. Si  $F_E^* > F$  rechace la hipótesis fundamental  $H_0 : m = 0$  con un riesgo menor del 5% de estar en equívoco (note que esta hipótesis es equivalente a establecer que **Y** depende de **X**). Para estos cálculos emplee:

$MS_R = \sum_i (Y_i^R - \bar{Y})^2 \dots\dots\dots (6)$  donde  $\bar{Y}$  es la media aritmética de los **NxM** valores de **Y**. ( $MS_R$  la llamamos media de los cuadrados debida a la regresión).

$S^2 = \sum_i (Y_i - Y_i^R)^2 / (BxM - 2) \dots\dots\dots (7)$  donde  $Y_i$  son los valores de la variable independiente **Y**. ( $S^2$  = media cuadrática alrededor de la regresión o errores).

4. Así mismo calcule el coeficiente de determinación (coeficiente de correlación al cuadrado) que permitirá expresar en por ciento la proporción de la variación total alrededor de la media **Y** explicada por regresión, lo cual es notable cuando dicho coeficiente se expresa por:

$$R^2 = \sum_i (Y_i^R - \bar{Y})^2 / \sum_i (Y_i - \bar{Y})^2 \dots\dots\dots (8)$$

mismo que podrá calcular también, empleando la ecuación que ha venido empleando anteriormente. Por supuesto podría hacer la prueba de hipótesis en (iii) usando **r**.

5. Finalmente, una vez aceptada alguna correlación como ley Física, puesto que los parámetros que definen la regresión tienen interpretación Física y por supuesto carácter aleatorio, entonces será conveniente calcular su intervalo de confianza. La desviación estándar estimada de **m\*\*** será:

$$S_m = S / (\sum_i (X_i - \bar{X})^2)^{1/2} = S \left( \frac{n}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (9)$$

Aquí  $X_i$  son los **NxM** valores de la variable independiente o predictora y  $\bar{X}$  es la media de ellas.  $S_m$  también recibe el nombre de error estándar (error aleatorio).

Tomaremos, usando  $\alpha = 0.05$  un intervalo con límites de confianza en 95% para **m** con el valor:

$$m^* - t(NxM-2, 0.975) S_m ; m^* + t(NxM-2, 0.975) S_m$$

así el valor de **m** estará comprendido en ese intervalo con dificultad de 95%. Para calcular **t(NxM-2, 1α/2)** bastará consultar una tabla con la función **t** de Student.

Lo mismo podemos hacer para el valor de **b**. Se usa para ello:

$$S_b = (\sum X_i^2 / ((\sum_i (X_i - \bar{X})^2)^{1/2}) S = S \left( \frac{\sum x_i^2}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(10)$$

calcule estos intervalos en el caso de una regresión *aceptada*.

### Experimento (b).

Por la forma en que se propone el experimento, la propuesta de correlación será en este caso **T = T(X)**, para considerar la solución del problema mecánico. Ahora experimentando informalmente concluya si es viable lo siguiente:

Para una distancia fija, cambie el ángulo de inclinación y observe para distintos valores, concluya:

**T proporcional a aceleración <sup>α</sup> (X = constante)**

Ahora para un ángulo fijo y distintos valores de **X**.

**T proporcional a distancia <sup>β</sup> (a = constante)**

De esto inferimos algebraicamente **T proporcional a <sup>α</sup>X<sup>β</sup> ..... (11)**

Trabajando la proporcionalidad en (11) se tiene:

$$(T) = (L/T^2)^{\alpha} (L)^{\beta}$$

de donde podemos concluir que: **α + β = 0 ; - 2 α = 1** , por lo tanto: **α = -1/2** y **β = 1/2** y de acuerdo con esto podemos sugerir la correlación.

$$T = AX^{\beta} \dots\dots\dots (12)$$

Donde seguramente en **A** está contenida información acerca de cantidades que estuvieran manteniéndose constantes.

Se puede linealizar la expresión (12) usando logaritmos, por ejemplo si empleamos **Ln**, tendremos que:

$$LnT = B LnX + LnA \quad \text{o} \quad LnT = M LnX + b \dots\dots\dots (13)$$

con la clara identificación  $m = B$  y  $b = LnA$ .

Realice todos los pasos desglosados en los puntos (i) a (iv) en el experimento (a) para las propuestas de correlación:

$$T = mX + b \dots\dots\dots (14)$$

y para la dada en la ecuación (13). (*Omita la búsqueda de una propuesta cuadrática si se rechaza (14)*).

### ANÁLISIS FINAL:

Para ambos experimentos, realice una identificación adecuada de los parámetros de regresión encontrados con cantidades físicas, en particular en el segundo experimento, correlación 12, deberá justificar la posibilidad de tomar  $b = \frac{1}{2}$  y derivando dicha expresión poder concluir  $a_{exp} = 2/A^2$ . Realice el análisis dinámico de ambos experimentos de acuerdo con (1) y (2) hasta obtener una relación entre los momentos de inercia y la aceleración lineal y relacione las cantidades adecuadas con los valores experimentales para determinar por ejemplo el momento de Inercia de los cuerpos. En estos términos físicos, de una evaluación también de los resultados obtenidos. Por ejemplo en el segundo caso, determine el momento de Inercia del balón empleado por fórmula directa y compare con el obtenido en lo primeramente desarrollado.

### OBJETIVOS:

*Al finalizar el experimento:*

- ◇ *Determinará el comportamiento de un cuerpo elástico bajo la acción de una fuerza.*
- ◇ *Determinará el rango del comportamiento elástico de varios materiales.*
- ◇ *Propondrá una ecuación lineal que represente el comportamiento elástico de los materiales.*
- ◇ *Determinará con aproximación el módulo de Young de varios materiales.*

### INTRODUCCIÓN TEÓRICA.

Anualmente en los diarios se detallan diversas situaciones, que con el tiempo, se hacen cotidianas durante la época de lluvias. Cada año suceden fenómenos meteorológicos y que provocan desbordamientos de ríos y los consecuentes rompimientos de puentes y carreteras. En esos casos, se cuestiona respecto a los materiales utilizados en dichas obras, sobre los estudios y pruebas que se realizan con los diseños de puentes y carreteras, tales como: ¿se hacen estudios del suelo y de subsuelo de cada proyecto vial?, ¿Se hacen pruebas de las estructuras y cimientos de los puentes y carreteras?.

Las pruebas que deben realizarse son del tipo destructivas y no destructivas. En las primeras se produce un consumo de material que en la mayoría de las veces es muy costoso, sin embargo, es necesario hacerlas para evitar pérdida de vidas humanas. Así por ejemplo, en el diseño de un automóvil, es necesario realizar pruebas destructivas para verificar la eficiencia del diseño de las bolsas de aire, en caso de choque o del diseño del chasis, etc. En el segundo tipo de pruebas, las no destructivas, se someten los materiales a condiciones tales que no alteren su naturaleza, como por ejemplo, la prueba de deformación de un resorte en posición vertical, cuando se le coloca una masa en el extremo más bajo y el otro extremo fijo. En este caso, se pretende obtener información del comportamiento del resorte antes de llegar a la situación en donde se destruya o se altere la naturaleza propia del resorte.

En esta ocasión se pretende someter a los materiales a pruebas destructivas para descubrir o mostrar las propiedades mecánicas que poseen dichos materiales. Estas propiedades pueden ser: **Deformación, Dureza o Tenacidad.** El concepto “Deformación”, que consiste en el cambio de dimensiones del material, ocurre cuando se le aplica un esfuerzo (Fuerza por unidad de Área), en tanto la “Tenacidad”, es la respuesta a la cantidad de energía que absorbe un material antes de fallar por fractura.



## DEFORMACIÓN ELÁSTICA, PLÁSTICA Y RUPTURA.

Cualquier material se deforma al aplicársele un esfuerzo, sin embargo en algunos sólidos, la deformación desaparece cuando desaparece el esfuerzo aplicado. A este tipo de deformación se le denomina **Deformación Elástica** (prueba no destructiva).

La deformación elástica ocurre siempre dentro de un rango de valores del esfuerzo aplicado, si se aplican esfuerzos fuera de dicho rango, la deformación no desaparece al quitar el esfuerzo, es decir, la deformación es permanente; en este caso se dice que la deformación es plástica. Si el esfuerzo aplicado todavía es mayor, ocurrirá la ruptura del material, en tal caso se ha incurrido en una prueba del tipo destructiva.

La figura 1 ilustra, gráficamente el comportamiento de la deformación lineal de un material a consecuencia de un esfuerzo aplicado.

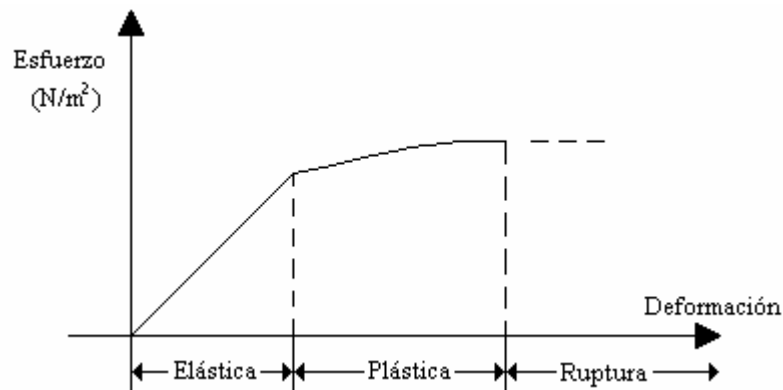


Figura 1. Deformación lineal elástica, plástica y ruptura de un material.

## MODULO DE YOUNG.

La relación entre esfuerzo (s) y deformación en la región elástica se llama “Modulo de Elasticidad de Young” (E).

$$s = e E$$

Donde: s = Esfuerzo Normal =  $F/A$  = Fuerza por unidad de Área

$$e = \text{Deformación Lineal} = \text{Variación de Longitud} / \text{Longitud original} = \frac{L_f - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

$$\frac{F}{A} = E \left( \frac{\Delta L}{L_0} \right)$$

Despejando F se tiene:  $F = E \Delta L \left( \frac{A}{L_0} \right)$

$$F = \left( E \frac{A}{L_0} \right) \Delta L$$

Finalmente se obtiene:

$$F = (k) \Delta L \quad \dots\dots\dots \text{ec. 1.}$$

Donde k es la constante del experimento que se le llama constante de elasticidad

$k = E \frac{A}{L_0}$  Es conveniente notar que en el experimento no se ha medido el cambio en la sección transversal del material.

### TRABAJO EXPERIMENTAL PROPUESTO

Se propone estudiar la deformación que sufre un cable de acero o de cobre de un diámetro de 0.2 mm cuando es sometido a una tensión. Para esto, arme el dispositivo experimental mostrado en la figura 4 con el material siguiente:

- ⇒ 2 Muestras de alambre de 60 cm de longitud: hierro y cobre.
- ⇒ 3 Varillas de 25 y una de 50 cm de longitud.
- ⇒ 1 Varilla soporte de 100cm de longitud.
- ⇒ 1 Polea enchufable.
- ⇒ 2 Asas soporte enchufable.
- ⇒ 2 Mordazas: de mesa y universal.
- ⇒ 3 Nueces.
- ⇒ 1 Flexómetro.

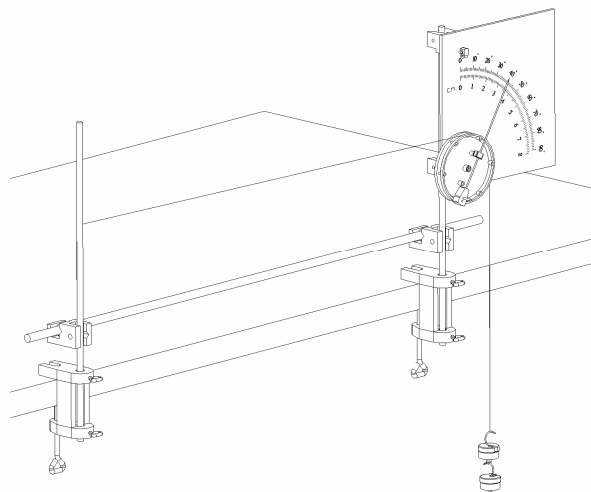


Figura 3. Dispositivo para estudiar la deformación de un alambre.

## OBSERVACIÓN INICIAL DEL FENÓMENO.

Con el propósito de observar el comportamiento y desarrollo de este fenómeno, realice los siguientes pasos.

Paso 1. Arme el dispositivo mostrado en la figura 3.

Paso 2. Fije la muestra de alambre (Fierro o Cobre) sobre la varilla soporte del lado izquierdo, enrollándola firmemente (dos vueltas). El otro extremo del alambre debe pasar sobre la polea. Haga un pequeño nudo en este extremo y coloque una pequeña pesa (50 gr).


Paso 3. Compruebe que la aguja indicadora indique el cero de la escala.

Paso 4. Coloque tres pesas en el extremo derecho del alambre. Observe el leve movimiento de la aguja durante 30 o 60 s. Ahora retire estas tres pesas adicionales y observe el movimiento de la aguja indicadora.

Paso 5. Repita el paso anterior, pero ahora con un mayor número de pesas (10 pesas) al mismo tiempo.

### 1. Descripción del Fenómeno.

Forme una relación de las cantidades físicas que representen alguna propiedad o característica del fenómeno físico.




---

---

### 2. Planteamiento de la Hipótesis.

Es de interés observar la deformación del alambre y su relación con la tensión aplicada. Basándose en este interés y después de observar el desarrollo y comportamiento del fenómeno, formule una hipótesis de comportamiento que considere adecuada.



Hipótesis

---

---

### 3. Experimentación.

Este proceso de experimentación está formado por una serie de pasos encaminados a especificar por medio de la llamada LEY FÍSICA el comportamiento del fenómeno en alguno de sus aspectos de interés. Y con ella, especificar la veracidad o falsedad de la hipótesis

planteada previamente. Con este propósito desarrollo lo siguiente:

**a) Definición de las cantidades físicas involucradas.**

Especifique las cantidades físicas que están involucradas en la hipótesis planteada. En estos casos, sólo son dos las cantidades físicas, con sus unidades de referencia.

1a. Cantidad Física \_\_\_\_\_

2a. Cantidad Física \_\_\_\_\_

**b) Descripción del dispositivo experimental.**

Utilice figuras, dibujos y textos para describir los componentes que forman el dispositivo ensamblado en la parte inicial de este trabajo experimental, y como consecuencia defina la cantidad física que se propone como independiente y la otra cantidad física como dependiente.

Cantidad Física Independiente (X) \_\_\_\_\_

Cantidad Física Dependiente (Y) \_\_\_\_\_

**c) Reproductividad del fenómeno.**

En esta parte se reconstruirán los pasos del 2 al 5 definidos en la sección denominada “Observación Inicial del Fenómeno” de la parte inicial de este trabajo experimental, con las siguientes modificaciones:

- ◇ Fije **OTRA** muestra de alambre (Fierro o Cobre) sobre la varilla, soporte del lado izquierdo enrollándola firmemente (dos vueltas). El otro extremo del alambre debe pasar sobre la polea. Haga un pequeño nudo en este extremo y coloque una pequeña pesa (50 gr).
- ◇ Compruebe que la aguja indicadora indique el cero de la escala. Mida la longitud del alambre (de la varilla soporte a la polea):  $L_0 = \text{_____ cm}$ .
- ◇ Vaya colocando pesas en el extremo derecho del alambre y tome nota del desplazamiento angular indicado en el transportador. Espere unos segundos hasta que se observe que la aguja se estabilice (30 s). Realice este proceso hasta que el alambre se rompa. Anote sus lecturas en la tabla 1.

M (gr)										
$\Theta$										

Tabla 1. Datos de deformación de un alambre sometido a una tensión

1. Haga la conversión de grados a radianes y anote sus resultados en la tabla 2. Además, calcule la tensión a la que está expuesto el alambre con la expresión  $T = Mg$ . Anote sus resultados en la tabla 2.
2. Calcule la deformación del alambre utilizando la expresión:  
Cambio de Longitud = Deformación  $= \Delta L = R * \Theta$

Anote sus resultados en la tabla 2.

T (Nt)										
$\Theta$ (rad)										
$\Delta L$ (m)										

Tabla 2. Conversión de datos de deformación de un alambre

#### d) Gráfica de Dispersión.

Haga una gráfica de dispersión considerando a las tensiones (T) en el eje de las abscisas y los valores de las deformaciones  $\Delta L$  (m) en el eje de las ordenadas.

#### e) Interpretación.

En esta parte del proceso de experimentación se pretende determinar el rango de valores de la tensión para la cual existe una relación lineal entre ella y la deformación. Para tal fin, desarrolle los pasos siguientes (Ver Apéndice C).

1. **Inspección visual:** Determine la tendencia de los puntos graficados mediante un análisis visual de la gráfica anterior.

**Tendencia** \_\_\_\_\_

Lineal o No lineal

2. **Inspección numérica:** Determine el coeficiente de determinación y utilice el criterio siguiente:

Si  $r^2$  es mayor o igual a 0.95 se dice que los datos presentan una tendencia lineal.

Si  $r^2$  es menor a 0.95 se dice que los datos presentan una tendencia que no es lineal.

3. En caso de que las dos inspecciones anteriores resulten de Tendencia Lineal, continúe con el paso siguiente. En caso contrario, realice las dos inspecciones anteriores considerando todos los datos analizados **menos el último** de ellos. Es decir, analizar los valores experimentales hasta determinar su rango lineal.

4. **Aleatoriedad en los puntos graficados.**

- ◇ Determine los parámetros de la línea de mejor ajuste ( $m^*$ ,  $b^*$ ) para los valores (F,  $\Delta L$ ).
- ◇ Trace la línea de mejor ajuste sobre la gráfica de dispersión y visualice la ubicación de los puntos graficados respecto a dicha línea.
- ◇ Si la ubicación se considera aleatoria o los puntos están sobre la línea, entonces se dice que existe una relación lineal entre las cantidades consideradas (F,  $\Delta L$ ), dada por la línea de mejor ajuste ( $\Delta L = m^*F + b^*$ ) y se termina el proceso de los tres pasos. En caso contrario, se recomienda repetir la captura de datos con mayor cuidado.

**f) Ley Física.**

Con el proceso de los tres pasos (ver apéndice C), se prueba que existe una relación lineal entre las variables ( $F$ ,  $\Delta L$ ) de la forma:  $\Delta L = m^*F + b^*$ . Y como esta ecuación está en términos de las variables originales, entonces se dice que esta expresión es considerada como una Ley Física.

**g) Comparación de resultados:**

1. Evaluación de la hipótesis. La ley física encontrada muestra que existe un rango elástico, es decir, que existe un rango de valores de la tensión para los cuales el material expuesto a tensiones recupera su longitud original en el momento en que se elimina la tensión (NO se deforma). También, demuestra que existe otro rango no lineal (rango plástico) en donde el material se deforma.

Lo anteriormente expuesto, compárelo con lo expresado en la hipótesis previamente planteada y determine su **falsedad** o su **veracidad**.

2. Al considerar que este experimento es una buena aproximación al fenómeno de deformación, es posible igualar la expresión teórica ec1 con la ley física anterior, como se muestra a continuación:

$$E \frac{A}{L_o} \Delta L = \frac{1}{m^*} \Delta L - \frac{b^*}{m^*}$$

De esta igualación se puede construir lo siguiente.

3. Que el valor de  $b^*/m^*$  representa un error en el proceso experimental al considerar las condiciones iniciales. El valor de  $b^*$  debe ser muy cercano a **cero**.
4. Que el valor de  $m^*$  debe ser:

$$\frac{1}{m^*} = E \frac{A}{L_o}$$

Despejando a la constante E se tiene:

$$E = \frac{L_o}{m^* A}$$

Con esta expresión es posible determinar experimentalmente un valor del Módulo de Young.

## OBJETIVOS:

- ◇ Al finalizar el experimento el alumno:
- ◇ Elaborará gráficas en papel milimétrico, semilogarítmico y logarítmico de dos variables aleatorias medidas en el laboratorio.
- ◇ En base a la elección de la gráfica que más se ajuste a una recta determinará los parámetros de la línea, por el método de mínimos cuadrados y calculará el coeficiente de correlación.
- ◇ Calculará los coeficientes de correlación de las cuatro gráficas y en base a los valores decidirá cual es el mejor ajuste.
- ◇ En base a su elección determinará el valor más probable de la aceleración de la gravedad que nos produce el experimento y evaluará los resultados suponiendo que la aceleración de la gravedad para la ciudad de México es de 977.44 cm/s.

## INTRODUCCIÓN TEÓRICA.

Los movimientos que se repiten a intervalos regulares del tiempo se llaman **Periódicos**. Los cuerpos se mueven hacia adelante y hacia atrás siguiendo una trayectoria lineal o angular entre dos posiciones.

La forma de representar el desplazamiento de un movimiento armónico simple es con:

$$X(t) = A \sin(\omega t + \phi)$$

Donde: **A** es la amplitud de la oscilación,  $\omega$  es la frecuencia angular, **t** es la variable temporal y  $\phi$  es la diferencia de fase o ángulo de fase. Existe una relación entre la frecuencia angular y el período de oscilación, es decir el tiempo que tarda el movimiento en realizar una oscilación, descritas por la expresión siguiente:

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

Todo sistema que varía en el tiempo de acuerdo con la expresión de **X(t)** se llama oscilador armónico simple, el cual tiene características importantes como: al suponer que no hay fricción la amplitud **A** es constante, la frecuencia **f** y el período **T** son independientes de la amplitud.

La solución de la ecuación diferencial donde sólo se considera el campo gravitacional actuando sobre el cuerpo que oscila tiene un período de oscilación descrito por la ecuación **X**

(t), y período que depende de la longitud  $L$  descrito de la forma:

$$T = 2\pi \left( \frac{L}{g} \right)^{1/2}$$

donde  $L$  es la longitud del péndulo y  $g$  es la aceleración de la gravedad.

### **MATERIAL A UTILIZAR.**

- ⇒ Un portapesas de 16cm de largo.
- ⇒ 2 pesas de 50gr cada una.
- ⇒ Un cronómetro digital.
- ⇒ Un flexómetro.
- ⇒ 10 cordeles de diferente longitud.
- ⇒ Un aditamento de cobre como soporte para cordel.
- ⇒ Una pinza de mesa.
- ⇒ Una varilla de 75cm de largo y 0.5" de diámetro.
- ⇒ Una nuez con gancho en el extremo.
- ⇒ Un transportador de 0° a 180°.

### **PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.**

1. Coloque la pinza de mesa y fíjela fuertemente.
2. Fije la varilla en la pinza de mesa y coloque la nuez con el gancho en la misma.
3. Coloque el aditamento de cobre en el gancho y el hilo más corto por uno de sus extremos.
4. En el otro extremo coloque el portapesas con las dos pesas de 50gr y déjelo que llegue al mayor reposo posible.
5. Mida la longitud del péndulo desde el gancho hasta donde termina la primera pesa y anótela en la tabla.
6. Separe el péndulo un ángulo aproximado de 15° con respecto a la vertical y suéltelo, mida el tiempo que tarda en realizar 20 oscilaciones y calcule el tiempo (período) de una oscilación anotando su resultado en la tabla 1.
7. Repita el procedimiento para los 10 diferentes hilos y complete la tabla 1.
8. Se recomienda que cada alumno haga sus mediciones y anote sus resultados en la tabla 1.



l (cm)	T1 (s)	T2 (s)	T3 (s)	T4 (s)	T5 (s)	Tprom (s)

Tabla 1. Tiempos de oscilación pendular.

### GUÍA DE ANÁLISIS.

1. Calcule el promedio de los períodos de oscilación del péndulo simple. Haga la gráfica de **L** en el eje horizontal y **Tprom** en el eje vertical.
2. Ahora en papel semilogarítmico, haga una gráfica de **L** en la escala normal y **Tprom** en la escala logarítmica.
3. Utilizando las mismas variables, haga la gráfica en papel semilogarítmico considerando a **L** en la escala logarítmica y **Tprom** en la escala normal.

L	Tprom	Log (L)	Log (Tprom)

4. Observe cada una de las tres gráficas anteriores y seleccione la gráfica que represen-

te mejor una linealidad entre las variables graficadas.

5. Otra manera de determinar si la relación entre variables se comporta linealmente o no, es utilizando el coeficiente de correlación, para lo cual se sugiere llenar la tabla siguiente:
6. Calcule los coeficientes de correlación para diversas transformaciones de las variables **L** y **T<sub>prom</sub>** de la forma siguiente:

Eje horizontal	Eje vertical	Coeficiente de correlación.
<b>L</b>	<b>T<sub>prom</sub></b>	
<b>L</b>	<b>Log (T<sub>prom</sub>)</b>	
<b>Log (L)</b>	<b>T<sub>prom</sub></b>	
<b>Log (L)</b>	<b>Log (T<sub>prom</sub>)</b>	

7. La relación entre las variables transformadas que presentan mayor linealidad es aquella que tenga el coeficiente de correlación más cercano a 1.0. Determine la relación que presenta esta característica.
8. Verifique el resultado anterior con la elección que hizo en 4.
9. Para realizar los análisis es conveniente tomar en consideración al coeficiente de correlación indicado en 7. A partir de aquí haga una introducción sobre las transformaciones a partir de posibles resultados.

### ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

- a) Si  $r_0$  es el coeficiente seleccionado, entonces la ley física estará dada por:

$$T = m L + b$$

- b) Si  $r_1$  es el coeficiente seleccionado, entonces se tiene:

$$\text{Log}(T) = mL + b$$

para obtener la relación entre las variables originales **T** en función de **L**, se emplea la transformación inversa, es decir, aplicamos el antilogaritmo a los dos miembros de la ecuación, resultando:

$$T = 10^{(mL + b)}$$

A la representación anterior se le llama curva exponencial, ya que la variable **L** se encuentra en el exponente. Se puede utilizar otro tipo de logaritmos que son los Neperianos **Ln** con base en el número **e**, de tal manera que se tiene la relación con logaritmos Neperianos dada por:

$$\text{Ln}(T) = L + b$$

al aplicar la exponencial en ambos lados de la ecuación, se tiene:

$$T = e^{(mL + b)} = e^{mx} * e^b$$

para esta transformación se puede determinar un número **a** de tal forma que **a = e<sup>b</sup>** con lo cual se obtiene la relación de manera más reconocida.

$$T = a e^{mx}.$$

- c) Para cuando el coeficiente de correlación **r<sub>2</sub>** es el más cercano a 1 o -1, se sigue la transformación:

$$T = m \log (L) + b \quad \text{o} \quad T = m \ln (L) + b$$

- d) Por último, si el coeficiente de correlación **r<sub>3</sub>** es el más cercano a 1 o -1, entonces la relación entre las variables es del tipo:

$$\log T = m \log (L) + b \quad \text{o} \quad \ln T = m \ln (L) + b$$

que al aplicar la transformación tipo inversa se llega a:

$$T = L^m * 10^b \quad \text{o} \quad T = L^m * e^b$$

Supóngase que existe una **a** de tal manera que **a = e<sup>b</sup>** entonces:

$$T = a L^m$$

lo anterior se obtiene al aplicar las propiedades de los logaritmos. Al comportamiento de este tipo se le llama potencial, ya que la variable independiente esta expresada como base de un número.

### CUESTIONARIO.

1. Determine la ley física cuyo coeficiente de correlación más sea aproxima a 1 0 -1.
2. En caso de que no sea del pito A, haga la transformación correspondiente y determine la **T** en función de **L** de manera que nos represente a la ley física experimental.
3. Determine hasta que error se obtiene del exponente de la expresión experimental con el modelo teórico.
4. Determine el error porcentual al calcular la aceleración de la gravedad y compararla con el valor aceptado de la Ciudad de México (977.44 cm/s).
5. Evalúe el experimento y proponga posibles modificaciones para hacerlo más reproducible y con mayor exactitud y precisión.

## OBJETIVOS:

◇ (Los fijará el maestro).

## INTRODUCCIÓN TEÓRICA:

(Desarrollo del maestro).

### Desarrollo del Experimento.

1. Arme el circuito que indica la figura.

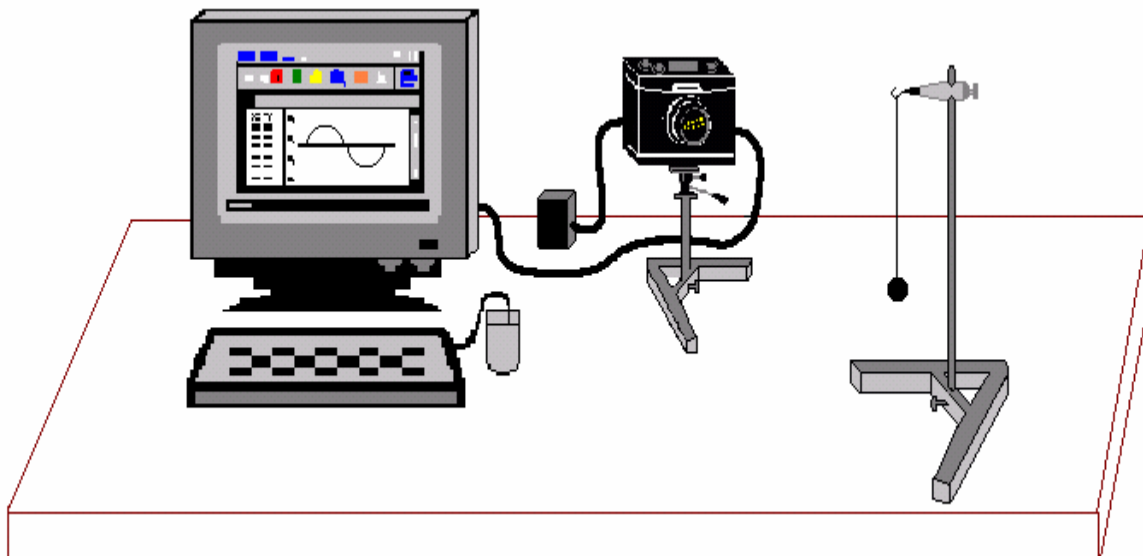


Figura 1. Péndulo simple con Videocom.

2. Coloque la cámara sobre la base tipo "V" frente al péndulo con una separación de 20cm y una altura del péndulo de 15cm. Ajuste el lente de la cámara con un diafragma 16.
3. Encienda la PC.
4. Ir a Inicio, Programas, Videocom y Videocom-Movimiento, y ↵.
5. Dentro del Software nos ubicamos en la opción de recorrido.
6. En el menú, elegir "ajustes/calibración de recorrido" y ↵.
7. Dentro de "ajustes/calibración de recorrido" hay varias opciones, damos ↵ en

“Predeterminados”.

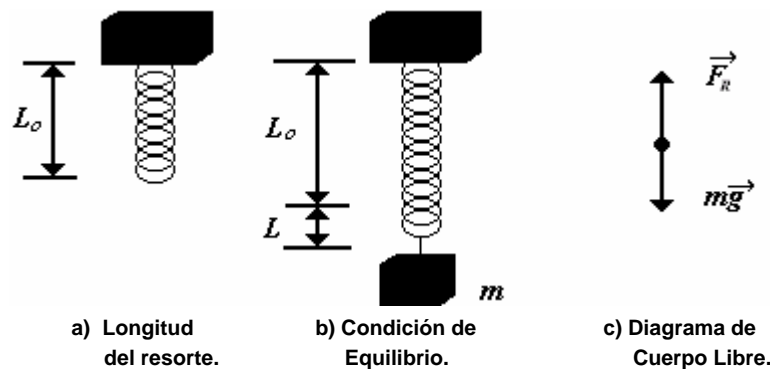
- a) En la opción después del Tiempo prefijado, le cambiaremos su valor y le damos 5 seg.
  - b) En la opción de “al recorrer la distancia” le cambiamos su valor y le damos 1m y ↵.
8. Damos ↵ en el mismo icono “ajustes/calibración de recorrido”.
  9. Dentro de “ajustes/calibración de recorrido” damos ↵ en la opción de “calibración de recorrido”.
    - a) En esta opción se cambian los valores de la 1ª y 2ª posición, en la primera el valor es de 1 y en la segunda será  $\emptyset$ . En esa misma opción damos ↵ en la opción “emplear calibración” y posteriormente elegimos aceptar.
  10. Antes de que se inicie el recorrido el péndulo debe estar a 15° para que se efectúe el recorrido.
  11. Damos ↵ en el icono de “iniciar/detener medición” y al mismo instante desplazar el péndulo.
    - a) Para observar la velocidad damos ↵ en la opción de “velocidad”, mostrando gráfica y valores.
    - b) Para observar la aceleración, damos ↵ en la opción de “aceleración” y nos va a mostrar su gráfica y sus valores.

## OBJETIVOS:

- ◇ Al finalizar el experimento el alumno:
- ◇ Podrá identificar un movimiento periódico.
- ◇ Observará la dependencia del tiempo de oscilación con la masa del objeto.
- ◇ Calculará la constante “k” del resorte.

## INTRODUCCIÓN TEÓRICA.

Considere el sistema físico formado por un resorte de longitud  $L_0$  y un bloque de masa  $m$ . El resorte se encuentra colocado verticalmente, como muestra la figura 1, con su extremo superior fijo a un punto y el otro extremo suspendido el bloque  $m$ .



En la posición de equilibrio, el resorte se deforma una distancia  $L$ , para satisfacer la primera condición de equilibrio:

$$\Sigma(\text{fuerzas que actúan sobre el bloque}) = 0$$

Con ayuda del diagrama de cuerpo libre (figura 1c) y siendo  $k$  la constante elástica del resorte se tiene:

$$\vec{F}_R + m\vec{g} = \vec{0}$$

$$\text{En forma escalar : } F_R - mg = 0 \Rightarrow kL - mg = 0$$

$$\text{Por tanto : } kL = mg$$

Supóngase que el objeto de masa  $m$  se encuentra a una distancia “y” por encima de su posición de equilibrio (figura 2).

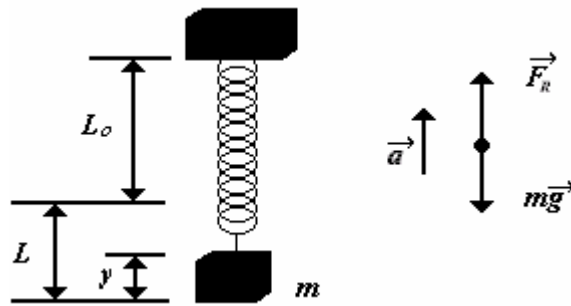


Figura 2. Sistema masa-resorte fuera de su posición de Equilibrio.

Esta condición dinámica del sistema se establece con la 2ª ley de Newton en los términos siguientes:

$$\Sigma(\text{fuerzas que actúan sobre } m) = ma$$

$$\vec{F}_R + m\vec{g} = m\vec{a}$$

$$\text{En forma escalar: } F_R - mg = ma$$

$$K(L - y) - mg = ma \Rightarrow kL - ky - mg = ma$$

Pero  $kL = mg$ , entonces :

$$mg - ky - mg = ma \Rightarrow ma = -ky$$

si  $a = \frac{d^2y}{dt^2}$ , entonces:

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = -ky \Rightarrow \frac{d^2y}{dt^2} = -\frac{k}{m} y$$

La ecuación anterior expresa que la segunda derivada de una función “y” con respecto al tiempo, es igual al negativo de la propia función “y” multiplicada por una constante. Una de las funciones que cumplen con esta propiedad es de la forma  $y(t) = \cos wt$ , puesto que:

$$d^2 \frac{(\cos wt)}{dt^2} = -w^2 \cos wt$$

al comparar esta ecuación con la ec.1, se tiene:  $w^2 = \frac{k}{m} \Rightarrow w = \frac{k}{m}$

Pero se sabe que:  $w = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$

Comparando las dos últimas ecuaciones:  $\frac{2\pi}{T} = \frac{k}{m} \Rightarrow T = 2\pi \frac{m}{k}$

### PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

Se propone estudiar el movimiento del sistema formado por un resorte colocado en forma vertical, cuyo extremo superior permanece fijo y en el otro extremo se coloca un bloque de masa **m**. Este sistema realiza un movimiento oscilatorio cuando se desplaza de su posición de equilibrio.

#### **Observación inicial del fenómeno:**

Con el propósito de observar el comportamiento y desarrollo de este fenómeno, realice los pasos siguientes:

Paso 1. Ensamble el dispositivo como muestra la figura 1b, con el material y equipo siguiente:

- Dispositivo con soporte tipo “A” y varilla de 50cm.
- Resorte.
- Marco de pesas.
- Cronómetro digital.

Paso 2.- Coloque en la parte inferior del resorte un bloque de 20gr.


Paso 3.- Evite el movimiento vertical y horizontal del sistema bloque-resorte colocando al sistema en su posición de equilibrio.

Paso 4.- Desplace verticalmente hacia abajo al sistema, una distancia de 2 a 3cm de su posición de equilibrio.

Paso 5.- Deje mover libremente al sistema bloque-resorte. Observe su desarrollo y comportamiento. Considerando lo observado anteriormente, proceda en el siguiente orden:

#### **1. Descripción del Fenómeno.**

Forme una relación de las cantidades físicas que representen alguna propiedad o característica de este fenómeno físico.




---

---



## 2. Planteamiento de la Hipótesis.

Es de interés observar en este movimiento oscilatorio sus características del tiempo de duración de una oscilación (período =  $T$ ) y su relación con la masa del bloque que se coloca en la parte inferior del resorte. En base a este interés y después de observar el desarrollo y comportamiento del fenómeno, formule una hipótesis de comportamiento que se considere adecuada.

 -hipótesis

---

---

## 3. Experimentación.

Este proceso de experimentación está formado por una serie de pasos encaminados a especificar por medio de la llamada LEY FÍSICA el comportamiento del fenómeno en alguno de sus aspectos de interés y con ella, es posible mostrar la veracidad o falsedad de la hipótesis planteada previamente. Con este propósito desarrolle lo siguiente:

### a) Definición de las cantidades físicas involucradas.

Especifique las cantidades físicas que están involucradas en la hipótesis planteada. En estos casos son dos las cantidades físicas. Especifique las unidades de referencia que se utilizan para cuantificar dichas variables.

### b) Descripción del dispositivo experimental.

Utilice figuras, dibujos y textos para describir los componentes que forman el dispositivo ensamblado en la parte inicial de este trabajo experimental y como consecuencia defina la cantidad física que se propone como independiente y la otra cantidad física como dependiente:

Cantidad física independiente (X): \_\_\_\_\_

Cantidad física dependiente (Y): \_\_\_\_\_

### c) Reproductividad del fenómeno.

En esta parte se reconstruirán los pasos del 2 al 5 definidos en la sección denominada “Observación Inicial del Fenómeno” de la parte inicial de este trabajo experimental, con las siguientes modificaciones:

- Inicie el proceso con un bloque de 5gr y con el cronómetro digital mida el tiempo que tarda el sistema bloque-resorte en efectuar 10 oscilaciones. Haga la medición 5 veces, no es necesario detener el sistema y volver a desplazar el sistema de 2 a 3cm. Anote sus mediciones en la tabla 1, dividiendo sus resultados entre 10, con el propósito de anotar los tiempos de duración de una oscilación (período =  $T$ ) del sistema bloque-resorte.

- Repita el paso anterior con bloques de masas como indica la tabla 1 y anote sus mediciones en esta misma tabla.

n	X <sub>i</sub> (gr)	Y <sub>i</sub> (seg)
1	5	
2	10	
3	15	
4	20	
5	25	
6	30	
7	40	
8	50	
9	60	
10	70	
11	80	
12	90	
13	100	
14	120	

Tabla 1. Tabla de valores originales.

**d) Gráfica de dispersión.**

Haga una gráfica de dispersión considerando a las masas en el eje de las abscisas y los valores de los períodos en el eje de las ordenadas.

**e) Interpretación.**

En esta parte del proceso de experimentación se pretende determinar la relación que existe entre las cantidades físicas Periodo.Masa. Para tal fin, desarrolle los siguientes pasos:

- e1) Con las parejas de valores ( $X_i$ ,  $Y_i$ ), determine la línea de mejor ajuste  $Y = m \cdot X + b^*$ .
- e2). Determine los valores calculados  $\hat{Y}_i = m \cdot X_i + b^*$

n	$X_i$	$Y_i$	$\hat{Y}_i = m * X_i + b *$	$Z = Y^2$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				

Tabla 2. Tabla de valores calculados y transformados.

- e3) La gráfica de dispersión construida anteriormente, muestra que la relación entre las cantidades Masa-Período es de una naturaleza No-Lineal, lo cual viene a ser verificado estadísticamente al calcular el coeficiente de correlación  $r$  y las diferencias notables entre los valores originales y los valores calculados (columnas 3 y 4). Observe que el coeficiente de correlación no se encuentra dentro del intervalo de aceptación.

$$r \notin [0.985, 1.0]$$

Por tal motivo se procede a construir una transformación que linealice la relación entre variables originales para formar la llamada ley física. Para alcanzar este propósito hay que desarrollar los siguientes pasos.

- e4) Aplique la transformación  $Z = Y^2$  a cada uno de los datos contenidos en la tabla de resultados, obteniéndose valores de  $Z$  para cada pareja de valores de  $(X, Y)$ , como se muestra en la 5ª columna de la tabla 2.
- e5) Construya la gráfica de dispersión con las parejas de valores  $(X_i, Z_i)$ .
- e6) Con las parejas de valores  $(X_i, Z_i)$ , determine la línea de mejor ajuste  $Z = m^{**}X + b^{**}$ .

e7) Defina la ley Física del fenómeno utilizando el criterio de aceptación. En el caso de que se satisfaga dicho criterio, entonces se puede establecer  $Z = m^{**}X + b^{**}$ , pero  $Z = Y^2$ , entonces la ley física resulta ser:  $Y^2 = m^{**}X + b^{**}$ . Continúe al siguiente paso que consiste en la comprobación de resultados. En caso de que **no** se satisfaga el criterio de aceptación será necesario revisar los datos.

#### 4. Comprobación de resultados.

En esta sección se pretende comprobar los resultados de este proceso experimental al efectuar una comparación entre lo establecido por la ley física y la hipótesis planteada previamente. También es conveniente comparar la Ley Física con el método teórico que representa a este movimiento oscilatorio del sistema bloque-resorte.

Para lo anterior, se tiene la introducción teórica inicial que:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Mediante operaciones elementales se puede obtener:

$$T^2 = \frac{(2\pi)^2}{k} = m$$

Al realizar una comparación de la expresión anterior con la ley física, se puede establecer:

$$m^{**} = \frac{(2\pi)^2}{k}$$

donde **k** es la constante elástica del resorte.

Si es posible conocer la constante elástica del resorte publicada por los fabricantes o determinada por otro proceso ( $k_{teo}$ ). Entonces, sea la constante **k** obtenida por la expresión anterior como ( $k_{exp}$ ), es posible determinar el error del experimento mediante la expresión siguiente:

$$\text{Error en el Experimento} = E_{exp} = \frac{|k_{teo} - k_{exp}|}{k_{teo}} * 100\%$$

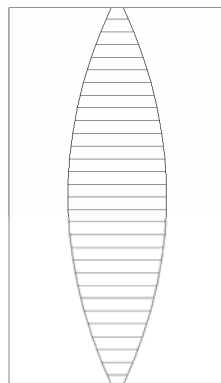
## OBJETIVOS:

- ◇ Al finalizar el experimento el alumno:
- ◇ Podrá predecir, verificar, formular y evaluar las relaciones entre las variables aleatorias que determinan el movimiento de una cuerda con movimiento estacionario y resonante.
- ◇ Evaluará el experimento con constantes aceptadas, a través del error porcentual relativo al experimento.

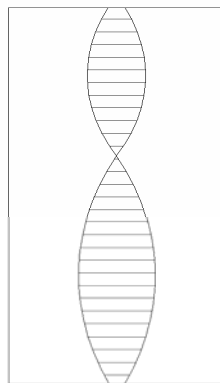
## INTRODUCCIÓN TEÓRICA.

El realizar experimentos sencillos nos puede mostrar que el controlar las variables, no siempre nos da la certeza de la no pérdida de materiales y en casos extremos de vidas. El determinar el modelo que describe al fenómeno no siempre nos asegura la confiabilidad de por vida, ya que pueden existir otras variables aleatorias que se presentan cambios en intensidad no considerados o que no se habían intensificado a los límites en los que se presentan.

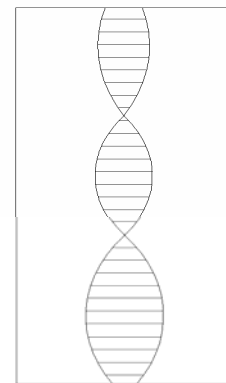
Por ejemplo las gráficas mostradas en las siguientes figuras, ilustran el movimiento de una cuerda entre dos puntos fijos (llamados nodos). En la primera ilustración se muestra la frecuencia fundamental, 1ª armónica que corresponde a media longitud de la onda estacionaria, en tanto que las otras dos ilustraciones nos muestran la segunda y tercera armónicas.



1a. Armonica



2a. Armonica



3a. Armonica

Figura 1. Vibración de una cuerda.

El hecho de conocer y representar la forma matemática de las ondas estacionarias nos da una aproximación a algunos fenómenos naturales e incluso a situaciones construidas por las personas. Ni considerar que la naturaleza no mantiene las condiciones bajo las cuales el

producto de la tecnología al servicio de la humanidad, se pueden producir catástrofes por las fluctuaciones de las supuestas constantes.

Para la siguiente ilustración se tiene el Puente de Tacoma que en noviembre de 1940 se cayó. Se supone que se presentó un fenómeno no previsto en el diseño llamado de resonancia. Se puede observar que el puente tiene dos extremos fijos (con cierta flexibilidad) y en la ilustración primera se puede notar que se tiene la primera armónica con cierta deformación transversal.

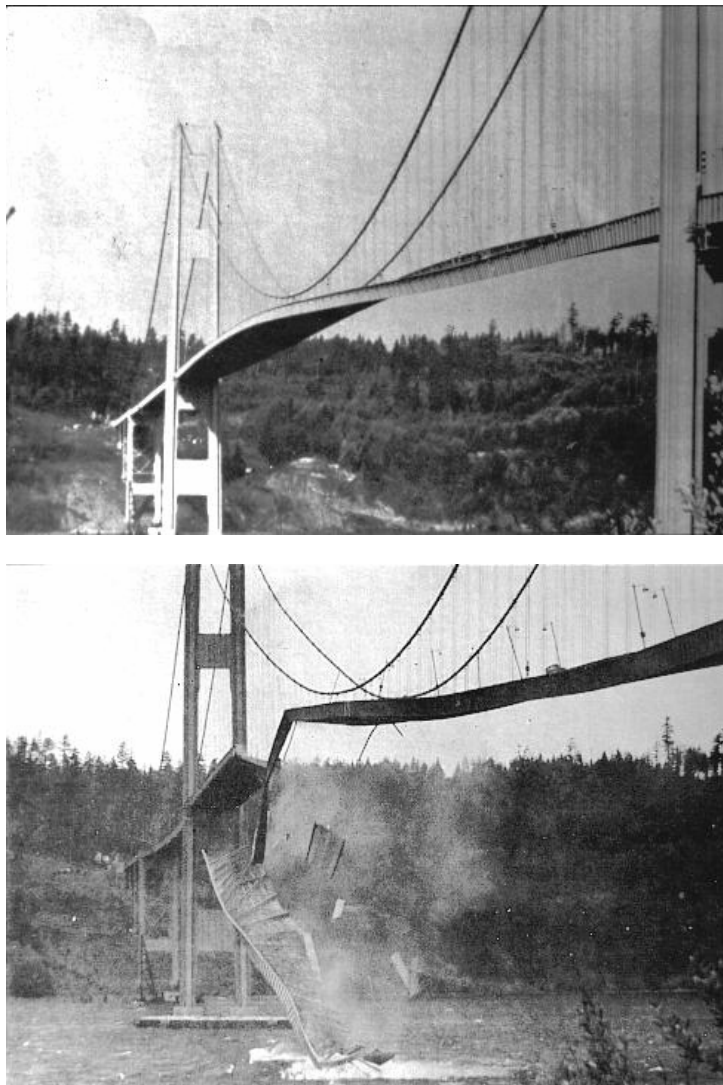


Figura 2. Puente de Tacoma

Una onda es una perturbación a partir de un estado de equilibrio que se propaga sin el

transporte de la materia, las ondas pueden transportar energía e información. Las ondas mecánicas viajan dentro o sobre la superficie de los materiales con ciertas características elásticas y las ondas no mecánicas se pueden propagar en el vacío (ondas electromagnéticas).

Existen dos tipos de ondas: *las transversales y las longitudinales*, en las del primer tipo el desplazamiento de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación de onda, en tanto que en las segundas, el desplazamiento es en la dirección de propagación de la onda.

Cuando dos o más ondas actúan al mismo tiempo y se traslapan para formar otra onda, efecto que se conoce como superposición de ondas y se satisface el principio de superposición. La superposición puede generar ondas constructivas o destructivas dependiendo de las condiciones en que se superponen. Por lo anterior y debido a que la interacción puede ser de manera diferente; existen puntos donde se pueden anular y sin embargo continuar transportando energía e ímpetu lineal, así como información.

Si una cuerda se encuentra sometida a una fuerza **F** producida por el campo gravitacional sobre una masa **m** y una onda se produce en la cuerda la velocidad de propagación de la onda se describe por:

$$F = \mu V^2$$

donde  $\mu$  es la propiedad del medio (cuerda) llamada densidad lineal de masa. La cuerda utilizada en el experimento tiene un valor de 400mg/m. La fuerza se considera el factor de restitución del material.

Si la cuerda se mantiene fija en dos extremos y se aplica una onda, esta se transmite y a l llega a uno de los extremos se refleja con una diferencia de fase de 180°. Si la cuerda se somete a ondas armónicas del tipo:

$$Y(x) = A \text{ sen } (wt)$$

la velocidad de propagación de la onda se describe por:  $V = f \lambda$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda y **f** la frecuencia; la frecuencia de una onda está determinada por la fuente, en tanto que su velocidad se determina por las características físicas del medio. Con respecto a la fuente de ondas que empleamos en el experimento, este consiste en un oscilador que trabaja con campos electromagnéticos generados por la toma domiciliaria de energía eléctrica cuya frecuencia es 60 Hz.

El funcionamiento del oscilador es muy simple, ya que al pasar la parte superior de la señal se atrae la laminilla y al pasar la parte inferior de la señal se vuelve a atraer la laminilla. Por

lo anterior la frecuencia de oscilación del generador de ondas es  **$f = 120 \text{ Hz}$** .

El hecho de mantener ondas armónicas en una cuerda sujeta a dos extremos, y debido a sus propiedades de reflexión se producen ondas estacionarias con nodos (superposición destructiva) y con antinodos (superposición constructiva), ésta última con amplitud del doble de la amplitud del oscilador.

Como la cuerda se considera flexible y la pulsación del generador es senoidal se producen ondas estacionarias resonantes en la cuerda y la primera resonancia ocurre cuando la distancia entre los extremos fijos es media longitud de onda. En general se relacionan las longitudes de onda, la distancia entre los extremos fijos y el número de nodos por:

$$\lambda_n = 2 L/n$$

$$f_n = nV/2L$$

a cada patrón de la onda estacionaria resonante se le llama modo normal de oscilación.

### **MATERIAL A UTILIZAR.**

- ⇒ Un oscilador.
- ⇒ Una conexión para el oscilador.
- ⇒ Una pinza de mesa.
- ⇒ Una polea de 4.0 cm de diámetro montada en un soporte.
- ⇒ Una base en forma de "A".
- ⇒ Una pinza doble nuez para varilla.
- ⇒ Una varilla de 45 cm de largo y 1.3 mm de grosor.
- ⇒ Un portapesas de bronce (16 g).
- ⇒ 10 pesas de 50gr cada una.
- ⇒ Hilo de cáñamo de 230 cm aproximadamente.
- ⇒ Flexómetro.

### **PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.**

#### **Experimento 1: Fuerza constante (mg).**

- a) En el extremo del hilo de cáñamo coloque el porta pesas y una pesa de 50gr; localice a una distancia aproximada de 190 cm la base en forma de A que contienen al oscilador montado en la doble nuez.
- b) Coloque el vibrador y la polea de tal forma que la altura del hilo en el extremo atado al oscilador y el extremo que pasa por la polea tengan una diferencia de 1.0 mm cuando



mucho.

- Conecte el oscilador a la toma de corriente y realice en el tiempo más corto posible, las indicaciones con la finalidad de no quemar el oscilador.
- Mueva la base A acercándola o alejándola a la polea, de tal manera que se hagan muy nítidos los nodos de vibración.
- Al realizar sus mediciones se debe medir con la mayor confiabilidad y cada alumno hará sus mediciones con la finalidad de trabajar el análisis de estas con los promedios y las dispersiones.
- Marca los lugares donde se tienen los 9 nodos iniciales y mide las distancias entre cada nodo y el extremo, o entre cada nodo. La longitud entre los nodos es la semilongitud de onda.
- Acerca la base en forma de A una distancia aproximada de la semilongitud de onda y realiza los ajustes necesarios hasta obtener la mayor amplitud y los nodos bien definidos. Mide las diferentes semilongitudes de onda y anótalas en la tabla 1.
- Completa la tabla 1 con las mediciones de cada integrante del equipo.

nodos n	$\lambda_{\text{PROM}} / 2$ cm	$\lambda / 2$ cm	$\lambda / 2$ cm	$\lambda / 2$ cm	$\lambda / 2$ cm	$\lambda / 2$ cm	L cm
9							
8							
7							
6							
5							
4							
3							
2							
1							

Tabla 1. Longitudes de semi-onda para varios nodos de vibración.

### Experimento 2: Número de nodos constantes (n).

- Utilizando el montaje descrito en el experimento (1), verifique la altura y la separación de la cuerda con una variación máxima de 1.0 mm.
- Coloque 10 pesas de 50gr cada una en el portapesas de 16cm y separe la base en forma de A de la polea, aproximadamente 190cm y ajuste la separación de tal manera que se tenga mejor definida la amplitud y los nodos de la onda.
- Obtenga 3 nodos de vibración y mida la longitud de la semi-onda. Mida la distancia

entre los extremos de la cuerda (**L**) y anote las mediciones en la tabla 2.

- d) Quite una masa de 50gr y localice la distancia **L** para obtener 3 nodos de vibración lo más definidos posible. Anote las mediciones en la tabla y continúe quitando las pesas hasta completar la tabla.

masa g	L Cm	$\lambda / 2$ cm	$\lambda / 2$ cm	$\lambda / 2$ cm	$\lambda_{\text{PROM}} / 2$ cm	nodos n
50						3
100						3
150						3
200						3
250						3
300						3
350						3
400						3
450						3
500						3

Tabla 2. Variación de la Tensión en la cuerda con tres nodos de vibración.

### Análisis de datos del 1<sup>ER</sup>. Experimento.

- Haga una gráfica del número de nodos **n** como variable controlable contra la longitud entre los extremos de la cuerda **L** (tabla 1).
- Haga el análisis de mediciones utilizando el método de cuadrados mínimos después de calcular el coeficiente de correlación. En caso de requerir alguna transformación, realizar las gráficas de **ln n** y de **ln L** para predecir el posible comportamiento de las variables.
- Calcule la longitud **L** promedio de todos los promedios, así como su dispersión. Por último determine el intervalo de confianza del 68%.
- Utilizando el modelo teórico descrito anteriormente, verifique el error porcentual en este experimento. No se olvide de interpretar los parámetros calculados por el método de mínimos cuadrados. Recuerden que se pide el 5% máximo de error porcentual; en caso de tener un error porcentual mayor, proponga un experimento para reducirlo, se puede emplear la propuesta para el proyecto experimental final.
- Se midió la densidad de la cuerda con una balanza cuya pesa mínima es de 100mg, obteniendo la medida de 400mg por unidad de longitud. Basándose en los resultados del experimento, determine y enuncie las variables físicas que se mantuvieron cons-

tantes en el primer experimento.

### **Análisis de datos del 2do. Experimento.**

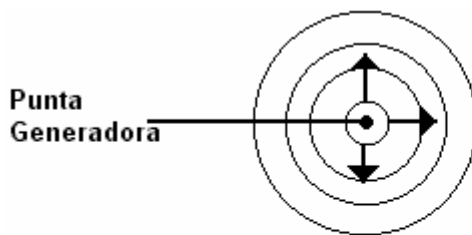
1. Complete la tabla 2, calculando  $\lambda_{\text{prom}}$  y anotando la longitud promedio de las medidas de cada integrante del equipo.
2. Grafique en papel milimétrico a la masa como variable independiente y la longitud de la cuerda como variable dependiente y basándose en ésta, determine si la relación entre ellas es lineal o no lo es (relativo a la segunda tabla).
3. En caso de no ser lineal, realice las gráficas en papel semilogarítmico y en papel logarítmico, hasta asegurar una linealidad.
4. Calcule los coeficientes de correlación para cada gráfica y determine la mejor transformación para obtener una dependencia lineal.
5. Determine la pendiente y la ordenada al origen del mejor ajuste lineal e interprete la relación experimental al aplicar la transformación inversa.
6. Compare los resultados experimentales con el modelo teórico y determine el error porcentual que se tienen los exponentes de las relaciones empíricas y teóricas.
7. Determine la rapidez más probable de la onda de la cuerda, considerando que la frecuencia de oscilación de la cuerda es de 120 Hz, y la longitud más probable de la semi-onda. haga una gráfica de rapidez contra la fuerza aplicada (mg) y determine la relación lineal entre las variables; ya sea de forma directa o usando alguna transformación de las que se conocen. Verifique el error al calcular la aceleración de la gravedad (g) y compárela con el valor aceptado para la ciudad de México.
8. Haga la gráfica de  $L$  contra  $\lambda$  y determine la relación lineal a través de alguna transformación, en caso de requerirse. Verifique la frecuencia a la que se mueve la onda en la cuerda y determine el error porcentual de acuerdo con el dato proporcionado. Calcule el error porcentual de la pendiente calculada con el modelo teórico.

## OBJETIVOS:

- ◇ *Mostrar la generación de ondas superficiales circulares y rectilíneas.*
- ◇ *Mostrar algunas de sus propiedades de transporte: reflexión, refracción y superposición.*
- ◇ *Medir algunos de los parámetros característicos de una onda superficial.*

## INTRODUCCIÓN TEÓRICA.

Cuando se hace vibrar la membrana superficial de cualquier líquido, se generan ondas de característica fundamentalmente superficial. El tipo de ondas generado depende del tipo de generador; un generador puntual produce ondas con frentes circulares, mientras que un generador recto (lineal) produce ondas con frentes lineales paralelos. La figura 1, muestra pictóricamente la representación de ambos tipos de frentes de ondas.



**a) Frentes circulares de ondas superficiales.**



**a) Frentes rectilíneos de ondas superficiales.**

Figura 1. Generación de ondas superficiales y formación de frentes de onda: circulares y rectilíneos.

Las características físicas de las ondas superficiales generadas, están relacionadas directamente con el agente generador de estas ondas; en este caso el agente generador es la presión de un chorro intermitente de aire que incide sobre la membrana superficial del líquido; la frecuencia de excitación de estos chorros de aire ( $f$ ) está relacionada con la longitud de ondas ( $\lambda$ ) de las ondas generadas y con la velocidad de propagación de las mismas ( $v$ ), a través de la ecuación:

$$v = f\lambda$$

## PROPIEDADES DE TRANSPORTE DE LAS ONDAS SUPERFICIALES.

- a) **Reflexión y Refracción.** Cuando un frente de ondas encuentra un obstáculo en su camino, parte del frente de onda se refleja (regresa hacia su dirección de incidencia) , mientras que otra parte cruza el obstáculo, es decir se refracta; la figura 2 muestra esquemáticamente este fenómeno, para el caso de un frente de ondas superficiales.

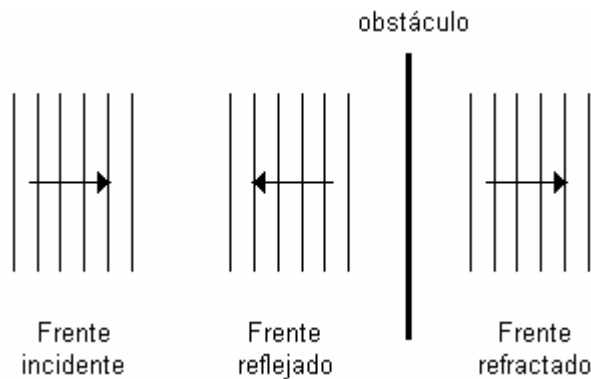


Figura 2. Reflexión y refracción de un frente de ondas superficiales rectilíneas.

- b) **Superposición de ondas superficiales.** Cuando un frente de ondas se cruza con otro, ocurre el fenómeno de superposición de ondas, el resultado de la superposición depende de las características de las ondas y de la forma en la cual se cruzan. La figura 3 ilustra dos posibilidades que pueden ocurrir.

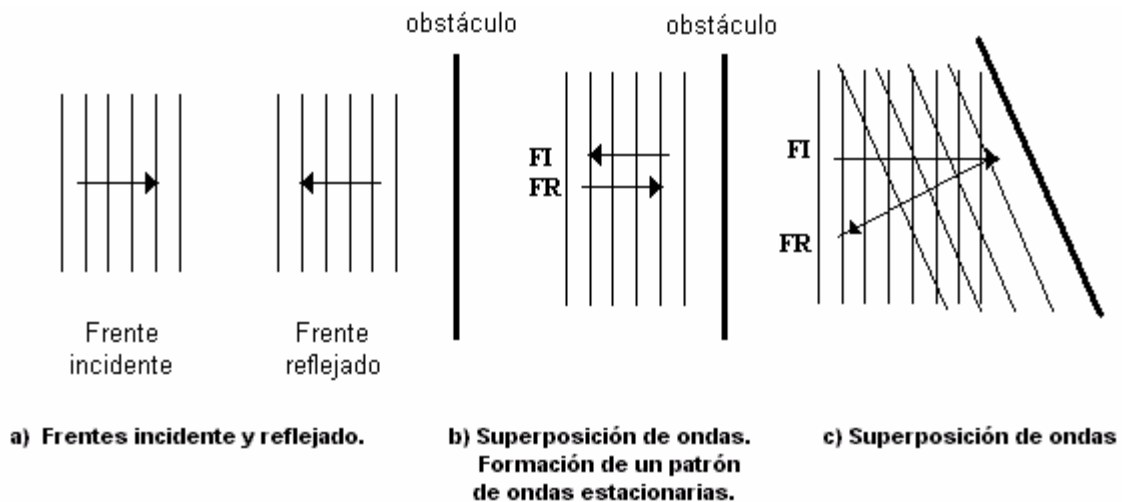


Figura 3. Reflexión de ondas superficiales rectilíneas por un obstáculo.

- c) **Difracción de ondas superficiales.** Cuando las ondas se superponen, ocurre el fenómeno de interferencia en este fenómeno dos o más ondas componentes se “unen” para formar otra onda, las características de la onda resultante dependen de la amplitud, frecuencia y fase de las ondas componentes. Dependiendo de la fase de ambas ondas, la interferencia puede ser parcial o máxima en ese último caso esta interferencia puede ser totalmente constructivo o totalmente destructiva.

Cuando la interferencia es totalmente constructiva, la amplitud de la onda resultante es la suma de las ondas componentes, mientras que si la interferencia es totalmente destructiva la amplitud de la onda resultante es cero, es decir la onda desaparece en el espacio donde ocurre la interferencia. La figura 5 muestra la interferencia de dos frentes de ondas circulares.

Uno de los fenómenos más representativos de la superposición e interferencia de ondas, es el fenómeno de difracción.

Este fenómeno puede ser visualizado con mucha claridad utilizando obstáculos de diferentes tamaños o bien un obstáculo grande con ranuras de distintos tamaños. Cuando un frente de ondas incide sobre una ranura colocada sobre un obstáculo grande (ver figura 4), el patrón de ondas resultantes después del obstáculo, depende fundamentalmente del ancho de la ranura y se pueden presentar las siguientes posibilidades:

- Si el ancho de la ranura es mayor que la longitud de onda del frente, entonces el frente de ondas pasa la ranura prácticamente sin alteración, excepto por pequeñas perturbaciones en los bordes de la ranura, donde se forman débiles frentes secundarios de ondas circulares.
- Si el ancho de la ranura es del orden de la longitud de onda, ocurre el fenómeno de difracción de las ondas, formándose después del obstáculo un patrón de difracción bien acentuado, con un máximo principal y máximos secundarios (Figura 5).
- Si el ancho de la ranura es mucho menor a la longitud de onda, entonces las ranuras actúan como excitadores puntuales de frentes secundarios de ondas circulares (figura 4). Estos frentes secundarios son muy importantes ya que poseen la propiedad de ser “coherentes”, es decir, las ondas que emergen desde estas ranuras se encuentran en fase y son muy útiles en los experimentos de difracción.

La figura 4 muestra la formación de frentes secundarios para ondas superficiales: circulares y rectilíneas.

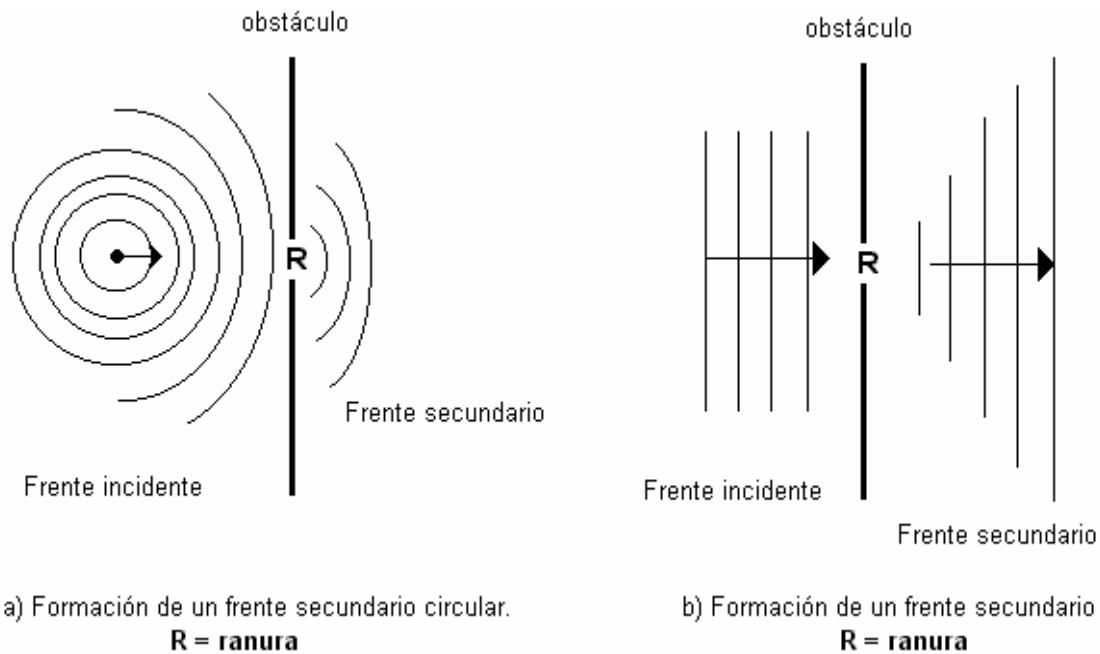


Figura 4. Formación de frentes secundarios de ondas superficiales circulares y rectilíneas.

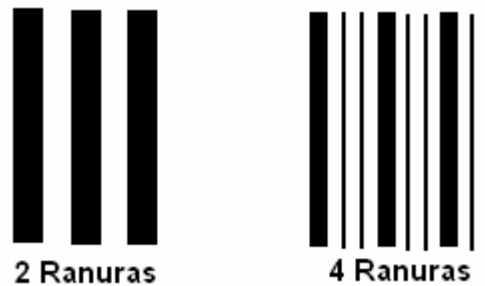


Figura 5. Difracción de ondas superficiales rectilíneas por 2 y 4 ranuras.

### MATERIAL A UTILIZAR.

- ⇒ Cubeta de onda con espejo, pantalla de proyección, dispositivo de iluminación y estroboscopio.
- ⇒ Generador de frecuencia para generadores de onda y estroboscopio.
- ⇒ 2 Excitadores para ondas circulares.
- ⇒ Generador para ondas planas.
- ⇒ Juego con diafragmas (pared de reflexión, ranura ancha, ranura cuádruple, rejilla, cobertura desplazable).
- ⇒ Juego de objetos refrigerantes (placas grandes, transparentes, planoparalelas, lentes biconvexas, lentes biconcavas, prisma).

- ⇒ Mangueras.
- ⇒ Pinza de manguera.
- ⇒ Botella de plástico.
- ⇒ Botella de goteo, con detergente.
- ⇒ Nivel esférico.
- ⇒ Regla graduada o un vernier.

## DESARROLLO EXPERIMENTAL.

Arme la cubeta de ondas superficiales siguiendo las instrucciones del manual de uso y las de su profesor; a continuación coloque la cubeta sobre su mesa de trabajo. Utilizando el nivel de burbuja, nivelar ésta ajustando la altura con los tornillos de la base.

Una vez nivelada la cubeta, vierta aproximadamente  $\frac{3}{4}$  de litro de agua (3 vasos) en el depósito y una gota de agua jabonada, para disminuir la tensión superficial del agua. ¡La cubeta de ondas está lista!

### 1er. Experimento: Generación de Ondas Superficiales Circulares y Rectilíneas.

#### a) Ondas Circulares.

- Monte el generador “puntual” sobre la corredera lineal fijándolo firmemente con el tornillo superior; enseguida con el tornillo inferior ajuste la altura del brazo, sumergiéndolo aproximadamente 4 – 5 mm abajo del nivel de la superficie.
- Encienda el excitador y el estroboscopio; saque lentamente el brazo puntual hasta que los frentes se vean nítidos.
- Una vez alcanzada la mayor nitidez, vaya variando la frecuencia del excitador, empezando con 15 Hz, a continuación regule la frecuencia del estroboscopio hasta que se detengan los frentes de onda (se congelen), para lograr esto, use también el tornillo de ajuste fino. Cuando esto ocurre, la frecuencia de excitación está en resonancia (es igual) con la frecuencia de generación de los frentes de onda. ¡Este es el momento de medir!
- Tome nota de la frecuencia de excitación y con una regla graduada mida sobre la placa de acrílico la separación promedio entre los centros de dos frentes de onda consecutivos.
- En la Tabla 1, anote esta frecuencia de excitación ( $f$ ) y la distancia medida entre los frentes, a esta longitud le llamaremos  $\lambda^1$ .
- Aumente la frecuencia de excitación a 20 Hz y repita el punto anterior. Siga aumentando la frecuencia de excitación y repita el procedimiento, hasta llenar las primeras 3



columnas de la tabla 1.

N°	f ( Hz)	$\lambda$ (m)	$\lambda$ (m)
1	15		
2	20		
3	25		
4	30		
5	35		
6	40		
7	45		
8	50		
9	55		
10	60		

Tabla 1. Frecuencia de excitación y longitud de onda de frentes circulares.

Para llenar la 4ª columna de la tabla 1, considere lo siguiente: para determinar el tamaño real de la longitud de onda  $\lambda$  de las ondas, es necesario tomar en cuenta la escala de la imagen que medimos sobre la placa de acrílico generadas en la cubeta y la que realmente se forma sobre la cubeta; de acuerdo a las reglas de la óptica geométrica, puede mostrarse que el tamaño real de la longitud de onda ( $\lambda$ ), se obtiene de la relación  $\lambda = \lambda^1/\beta^1$ ; siendo  $\lambda^1$  la imagen que medimos sobre la placa de acrílico y  $\beta^1 = y^1/y$  la relación entre los tamaños real ( $y$ ) y ampliado de la imagen ( $y^1$ ).

Para las dimensiones de la cubeta  $\beta^1 = 1.65$ . Este factor puede determinarse fácilmente colocando sobre la cubeta (sin agua) un objeto de longitud conocida y después midiendo la longitud de la imagen, que aparece sobre la placa de acrílico.

#### b) Ondas Rectilíneas.

- Monte ahora el generador de ondas rectilíneas colocándolo a 1cm aproximado de la parte transparente de la cubeta.
- Encienda el excitador de ondas rectilíneas, fíjelo a una frecuencia de 30 Hz y ajuste la altura del brazo hasta que los frentes de onda estén bien definidos.
- Ahora regrese el excitador a una frecuencia de 15 Hz; a continuación usando el regulador del estroboscopio y el ajuste fino, trate de “detener” (congelar) la imagen de los frentes de onda.
- Una vez que logre lo anterior, mida sobre la placa de acrílico la separación promedio

entre los centros de dos frentes consecutivos.

- Anote la frecuencia ( $f$ ) y la longitud ampliada ( $\lambda^1$ ). aumente la frecuencia a 20 Hz, repita el punto anterior y así sucesivamente hasta llenar la tabla 2.

N°	$f$ ( Hz)	$\lambda^1$ (m)	$\lambda$ (m)
1	15		
2	20		
3	25		
4	30		
5	35		
6	40		
7	45		
8	50		
9	55		
10	60		

Tabla 2. Frecuencia de excitación y longitud de onda de frentes rectilíneos.

## 2do. Experimento: Reflexión de Ondas Rectilíneas y Circulares.

### a) Reflexión de ondas rectilíneas.

- Con el mismo arreglo del experimento anterior (generador de ondas rectilíneas), coloque sobre la cubeta a unos 7 cm del generador, una barrera rectangular de lámina, paralela al generador rectilíneo.
- Encienda el excitador y busque la frecuencia que defina mejor los frentes, a continuación regule la frecuencia del estroboscopio hasta que se detenga la imagen de los frentes. Observe y tome nota.
- Ahora gire 45° (aproximadamente) la barrera y ajuste la nitidez de la imagen y detenga ésta. Observe y tome nota.

### b) Reflexión de ondas paralelas.

- En el mismo arreglo anterior, desmonte el generador rectilíneo y monte el generador "puntual". Repita las instrucciones del inciso anterior. Observe y tome nota.

## 3er. Experimento: Generación de Frentes Secundarios de Ondas Superficiales.

Cuando colocamos un obstáculo (o ranura en un obstáculo grande) de dimensión mucho

menor a la longitud de onda en el camino de un frente de ondas, estos actúan como nuevos excitadores de ondas circulares.

**a) Frentes circulares secundarios.**

- Usando el arreglo del experimento anterior (2), coloque a unos 7 cm de la punta del excitador una rendija simple (vea la figura 4), active el excitador y detenga la imagen para diferentes frecuencias. Repita el experimento usando ahora la punta de un lápiz. Observe y tome nota.

**b) Frentes rectilíneos secundarios.**

- Usando el mismo arreglo anterior, desmonte el generador circular y monte el generador rectilíneo. En forma similar al experimento anterior, coloque a 7 cm del generador rectilíneo una barrera con una rendija de dimensión menor a la longitud de onda, active el excitador y para diferentes frecuencias “congele” la imagen. Repita el experimento usando ahora la punta de un lápiz. Observe y tome nota.

**4to. Experimento: Difracción de Ondas Superficiales.**

**a) Difracción por un obstáculo con dos ranuras.**

- Monte el generador de ondas superficiales rectilíneas. Encienda el excitador y busque la frecuencia que produzca la mayor nitidez, para lograr esto también puede variar la altura del excitador.
- Una vez logrado lo anterior, trate de “detener” la imagen de los frentes de onda.
- Ahora coloque a 7 cm del excitador rectilíneo, una barrera con dos ranuras de ancho semejante a la longitud de onda, trate nuevamente de detener la imagen de los frentes variando la frecuencia del estroboscopio y levemente la altura del excitador. Observe y tome nota del patrón de interferencia.

**b) Difracción por un obstáculo con 4 ranuras.**

- Repita el punto anterior, usando un obstáculo con 4 ranuras. Observe y tome nota.

**c) Difracción por un obstáculo con 6 ranuras.**

- Repita el punto (a), usando un obstáculo con 6 ranuras. Observe y tome nota.

**d) Interferencia de dos frentes circulares de ondas superficiales.**

- Monte los dos generadores de ondas circulares en la cubeta y utilice la Y en la manguera, para suministrar aire a los dos excitadores.
- Active el excitador y busque una frecuencia que tenga buena nitidez, a continuación trate de detener la imagen de los frentes. Observe y tome nota.

**GUÍA DE ANÁLISIS.**

1. Usando los datos de la tabla 1, grafique las variables  $f$  y  $\lambda$ ; proponga una relación lineal

apropiada entre éstas, de tal forma que pueda efectuar una comparación con las cantidades físicas que aparecen en la ecuación (1). Una vez que haya hecho esto, determine los parámetros de la regresión. Usando el factor de conversión del tamaño de la imagen que aparece sobre el acrílico y las ondas en la cubeta, efectúe la comparación entre los resultados anteriores y determine la velocidad de propagación de los frentes de onda.

2. Repita el análisis anterior para los datos de la tabla 2.

### **Cuestionario.**

1. ¿Conoce algún otro tipo de ondas, diferentes a las estudiadas en este experimento?
2. ¿Por qué a medida que nos alejamos de la fuente generadora de ondas, estas van desapareciendo? Explique su respuesta.
3. ¿Cuáles ondas cree que lleguen más lejos, las de mayor longitud de onda o las de menor longitud de onda? Justifique su respuesta.
4. ¿Es lo mismo amplitud de onda que longitud de onda? Explique la diferencia, si existe ésta.
5. ¿Cómo podríamos medir la amplitud de una onda, de las usadas en este experimento?
6. ¿Cómo podríamos aumentar o disminuir la amplitud de las ondas generadas? Explique.
7. ¿Cómo afecta la profundidad del líquido de la cubeta, la generación y propagación de las ondas?
8. Proponga un método alternativo para determinar la velocidad de propagación de una onda.
9. La velocidad de propagación de las ondas que hemos determinado, ¿tiene alguna relación con la velocidad de FASE o velocidad de GRUPO de una onda? Argumente su respuesta.

## OBJETIVOS:

- ◇ Corroborar las leyes de la reflexión de la luz en un espejo plano.
- ◇ Construir un espejo cóncavo utilizando un conjunto de espejos planos.
- ◇ Investigar la reflexión de la luz y la formación de imágenes en espejos esféricos.

## INTRODUCCIÓN TEÓRICA.

**Reflexión de la luz en espejos planos.** Cuando un haz de luz que se propaga a través de un medio, alcanza la frontera o superficie que lo separa de otro medio, parte del haz incidente se refleja, la forma en que lo hace depende de las características de la superficie y de las propiedades físicas del segundo medio; si la superficie está “suficientemente” pulida se presentará lo que se llama “reflexión especular”, mientras que si la superficie es “rugosa”, se presentará lo que se llama “reflexión difusa”.

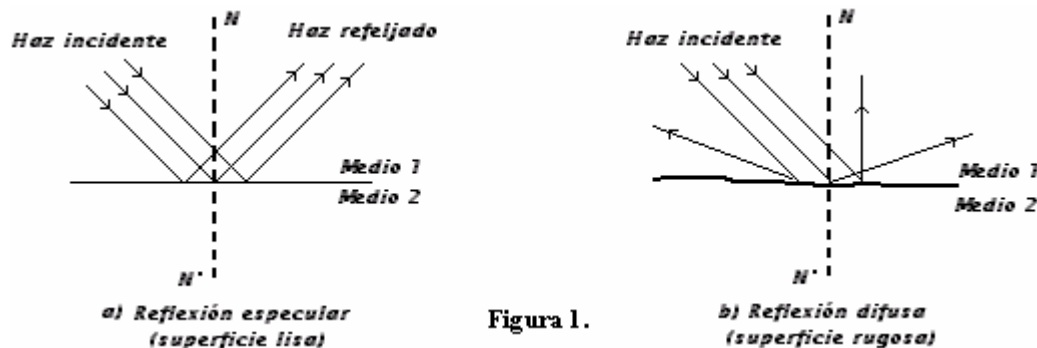


Figura 1.

FIGURA 1. Reflexión especular (a) y reflexión difusa (b)

Desde el punto de vista de la teoría ondulatoria, una superficie está suficientemente pulida y presentará solo reflexión especular cuando las irregularidades en esta superficie son menores a la longitud de onda de la luz incidente.

En el primer tipo de reflexión, los rayos del haz se reflejan todos en dirección paralela, mientras que en el segundo caso los rayos del haz se reflejan en todas las direcciones, en la naturaleza siempre se presentan ambos tipos de reflexión en menor o mayor grado. La figura 1 muestra los detalles de ambos tipos de reflexión.

En la vida diaria la reflexión difusa es muy importante ya que la luz al reflejarse en todas las direcciones permite la completa iluminación de un objeto, de otra forma no sería posible ver el objeto.

Los experimentos con reflexión especular muestran que el ángulo con el cual se refleja un haz de luz que incide sobre una superficie lisa, es **exactamente igual** al ángulo con el cual incide, a este hecho se le conoce como segunda ley de la reflexión. A nivel de “rayos” esta ley también es válida para la reflexión difusa, los detalles que corroboran esta afirmación se muestran en la figura 2.

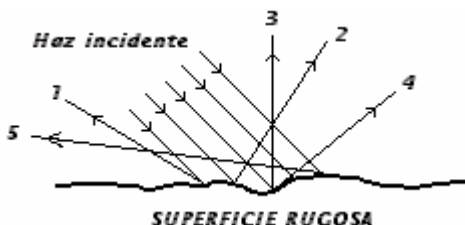


Figura 2. Validez de la segunda ley de la reflexión para reflexión difusa.

**Imágenes por reflexión.** Los haces de luz al reflejarse en una superficie lisa forman imágenes, las cuales pueden ser **reales** o **virtuales**. Una imagen es real cuando los rayos de luz que la forman pasan por ella, en consecuencia una imagen real puede ser captada en una pantalla; a diferencia una imagen es virtual cuando los rayos que la forman **no pasan** por la imagen y por tanto ésta no puede ser captada en una pantalla. Dependiendo del tipo de espejo utilizado (plano, esférico, etc...) y de la posición del objeto con respecto a éste, la imagen puede ser real o virtual.

La localización y tamaño de la imagen de un objeto se determina utilizando las correspondientes reglas de construcción de imágenes para espejos planos y esféricos, así para el caso de un espejo esférico hay que considerar que éste contiene 3 puntos característicos: el centro de curvatura (**C**), el foco (**F**) y el vértice (**V**), además se necesita utilizar 3 rayos para la construcción de la imagen de un objeto. De acuerdo a estas reglas: un espejo plano siempre genera imágenes virtuales, mientras que un espejo esférico puede generar imágenes reales o virtuales dependiendo de la posición en que se coloque el objeto, si el objeto se coloca más allá del foco, la imagen es real; en tanto que si se coloca antes del foco, la imagen será virtual; este último caso se ilustra en la figura 3.

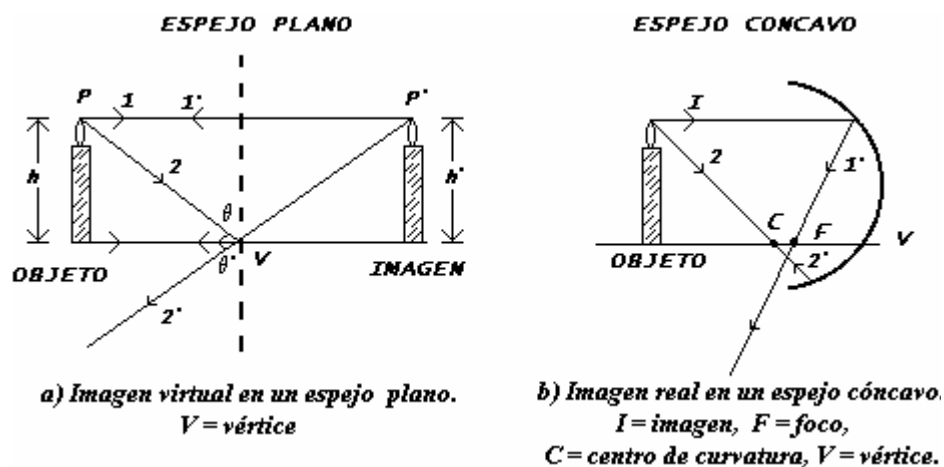


Figura 3. Imágenes: virtual en un espejo plano y real en un espejo cóncavo.

### MATERIAL A UTILIZAR.

- ⇒ Base giratoria de madera.
- ⇒ Fuente Lasser.
- ⇒ Plantilla angular para reflexión.
- ⇒ Pantalla para mesa con soporte.
- ⇒ 9 espejos planos de 8 x 5cm.
- ⇒ Prensa.
- ⇒ Trozo de madera con rayas.

Figura 4. Imagen virtual en un espejo cóncavo

### DESARROLLO EXPERIMENTAL.

#### 1ER. Experimento: Reflexión en un espejo plano.

1. Con la prensa fije la “base giratoria de madera” a su mesa de trabajo.

2. Con tiras de maskign-tape fije la plantilla angular para reflexión a la base giratoria, teniendo cuidado que el centro angular coincida con el eje de rotación de la “base giratoria”. PRECAUCION: EVITE QUE EL HAZ INCIDENTE O REFLEJADO DEL LASER LE DE DIRECTAMENTE EN LA CARA. ES MUY PELIGROSO.
3. Conecte a las baterías el laser y a continuación “alineee” este a lo largo de la línea de  $0^\circ$ , para esto puede desplazar transversalmente o girar el laser. Para checar que el haz este alineado utilice la tira de madera con rayas, tomando como referencia una de estas rayas, desplace la tira de madera desde el laser a lo largo de la línea de  $0^\circ$ . Para que el haz quede alineado debe coincidir con la raya de referencia al irlo desplazando.
4. Una vez que haya completado el proceso de alineación, coloque el espejo sobre la plantilla, la superficie posterior del espejo debe coincidir con la línea de  $-90^\circ$  a  $90^\circ$  de la plantilla.
5. Gire la base giratoria y la base del laser, de tal forma que este apunte en la dirección de  $-10^\circ$  para checar la dirección de incidencia de  $-10^\circ$ , use la tabla rayada, posteriormente usando la misma tabla rayada, busque el ángulo de reflexión del haz.
6. Gire nuevamente la base giratoria para obtener un ángulo de incidencia de  $-20^\circ$  y mida el ángulo de reflexión.
7. Repita el paso 5 para obtener ángulos de incidencia de  $-30^\circ$ ,  $-40^\circ$ ,  $-50^\circ$ ,  $-60^\circ$  y  $-70^\circ$ , localizando y midiendo los correspondientes ángulos de reflexión. Asiente todos sus datos en la tabla 1.

N° de Med.	Angulo de incidencia	Angulo de reflexión
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		

Tabla 1. Ángulos de incidencia y de reflexión.



### Guía de análisis.

1. De la comparación entre los ángulos de incidencia y los correspondientes ángulos de reflexión, ¿qué conclusión puede sacar?
2. Haga un análisis del dispositivo utilizado para efectuar el experimento y mencione al menos 5 fuentes de error.
3. ¿Qué sugerencias puede efectuar a fin de mejorar los resultados de este experimento? Enumere cada una de ellas.

Figura 5. Reflexión en un espejo plano. FL = fuente LASSER

### 2° Experimento: Construcción de un espejo cóncavo.

1. Coloque uno de los espejos de 8 x 5cm sobre la mesa de trabajo y a 40cm aproximadamente coloque una vela sin encender, vea la figura 6.
2. A la izquierda del primer espejo (pegado a él) coloque otro espejo y rótelos lentamente hasta que la imagen de la vela se ubique también en el centro de este espejo.

Figura 6. Construcción de un espejo cóncavo.

3. A la izquierda del espejo anterior coloque un tercer espejo siguiendo el mismo procedimiento del inciso anterior y así sucesivamente hasta que haya colocado 4 espejos a la izquierda del primero.
4. Repita el procedimiento (b).(c) colocando ahora 4 espejos a la derecha del primero. El espejo cóncavo ha sido terminado.

### **3ER. Experimento: Imágenes en un espejo cóncavo.**

1. Utilizando un espejo cóncavo construido antes, coloque la pantalla (para mesa) a unos 10 cm del vértice del espejo cóncavo.
2. Encienda la vela y mueva ésta entre el vértice del espejo y la pantalla hasta que capte la imagen en la pantalla, cuando esto ocurra tome nota de la distancia entre la vela y el vértice del espejo.
3. Utilizando el centro de curvatura y la distancia focal, construya geoméricamente sobre una hoja suficientemente grande la ubicación y tamaño de la imagen. Coteje sus resultados (tamaño, posición, etc...) con los resultados obtenidos en (b).

### **Cuestionario.**

1. Construya todas la imágenes posibles en un espejo cóncavo y describa las características (tamaño, posición, etc...) de la imagen con respecto al objeto.
2. Construya todas la imágenes posibles en un espejo convexo describa las características (tamaño, posición, etc...) de la imagen con respecto al objeto.

### **Referencias:**

- Física Vol. 2, R. Resnick, D. Halliday y K. S. Krane, CECOSA (1993).
- Física Vol. 2, R. A. Seray, McGraw Hill (1997).
- Física Vol. 2, P. A. Tripler, REVERTE (1995).

## OBJETIVOS:

- ◇ Visualizar a través de una serie de experiencias empíricas el fenómeno de la refracción de la luz.
- ◇ Determinar el índice de refracción de diversos materiales mediante la cuantificación de las variables que intervienen en el fenómeno de refracción de la luz.
- ◇ Visualizar el fenómeno de “reflexión total interna” de la luz.
- ◇ Determinar el ángulo crítico para diversos líquidos.
- ◇

## INTRODUCCIÓN TEÓRICA.

Cuando un haz de luz que viaja a través de un medio (1), alcanza la frontera de éste, una parte del haz se refleja y otra parte penetra al otro medio (2). La parte del haz que entra al segundo medio se desvía de su dirección de incidencia al cruzar la frontera entre ambos medios, cuando esto sucede se dice que ha ocurrido el fenómeno de “refracción de la luz”. Los elementos que intervienen en este fenómeno se muestran esquemáticamente en la figura 1.

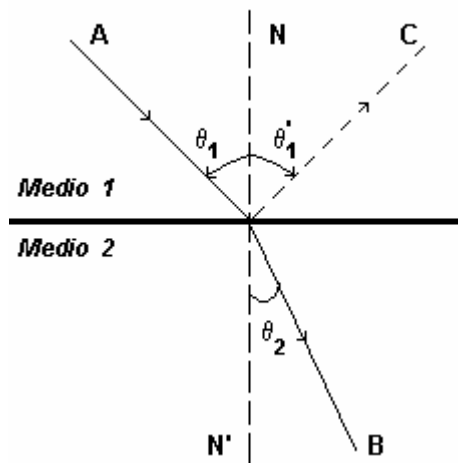


Figura 1. Fenómeno de refracción de la luz. A = Haz incidente, B = Haz refractado,  $\theta_1$  = ángulo de incidencia,  $\theta_2$  = ángulo de refracción y  $\theta'_1$  = ángulo de reflexión.

Con relación a la figura, el ángulo de refracción ( $\theta_2$ ) depende del ángulo con el cual incide el haz ( $\theta_1$ ) así como también de las propiedades de ambos medios.

**Índice de Refracción.** Cuando la luz viaja en el vacío alcanza su velocidad máxima de  $3 \times 10^8$  m/s (**c**), en cualquier otro medio su velocidad es menor. En estos términos definimos el índice de refracción (**n**) de cualquier medio como la razón entre las velocidades de la luz en el vacío (**c**) y su velocidad en ese medio (**v**), es decir:

$$n = \frac{c}{v} ; \text{ como siempre } c > v \text{ entonces } n > 1$$

denominando con **n<sub>1</sub>** al índice de refracción del medio desde el cual la luz incide y con **n<sub>2</sub>** al índice de refracción del medio, hacia el cual la luz penetra, se cumple la relación:

$$n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2 \quad \text{ec. (1)}$$

El descubrimiento de esta relación se atribuye a Willebrord Snell (1591 – 1627) y por esta razón se le conoce como “Ley de Snell” o también como 2ª Ley de la Refracción. Esta ley puede ser deducida a partir del principio de Huggens o de Fermat. Este último textualmente establece que “cuando un haz de luz viaja entre dos puntos **P** y **Q**, su trayectoria real será aquella que requiera el mínimo tiempo de transporte”. En este nivel es importante que el alumno consulte su libro de texto.

El fenómeno de refracción de la luz es una consecuencia directa del cambio en la velocidad de ésta, al pasar de un medio a otro, así cuando la luz pasa de un medio a otro donde su rapidez es menor, el correspondiente ángulo de refracción ( $\theta_2$ ), es más pequeño que el ángulo de incidencia ( $\theta_1$ ), medidos ambos ángulos a partir de la línea normal (NN'), tal y como ocurre para el caso de aire y vidrio, el cual se ilustra en la siguiente figura.

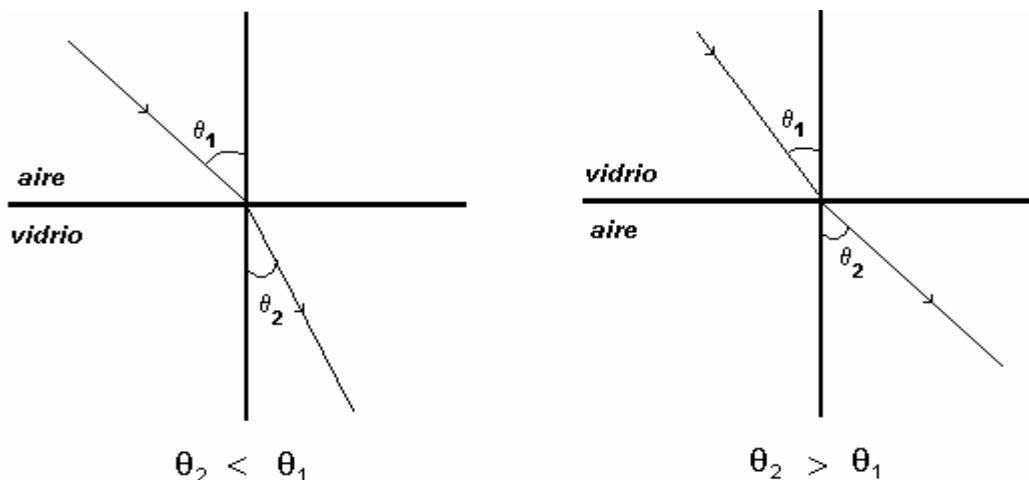


Figura 2. Refracción de la luz, para (a) aire-vidrio y (b) vidrio-aire.

La velocidad de la luz adquiere su máximo valor en el vacío ( $3 \times 10^8$  m/s) y su valor en el aire es aproximadamente el mismo; sin embargo cuando ésta viaja a través de un bloque de vidrio, su velocidad se reduce a  $2 \times 10^8$  m/s, sin embargo al emerger del bloque de vidrio, nuevamente adquiere su valor de  $3 \times 10^8$  m/s. La explicación de porqué la velocidad de la luz decrece al ir del vacío a cualquier otro medio (o de un medio cualquiera a otro de mayor densidad) es una consecuencia del decrecimiento en la amplitud de oscilación de los campos electromagnéticos asociados a una onda luminosa, dentro del marco de la teoría ondulatoria de la luz.

Usando el fenómeno de refracción es factible caracterizar algunas de las propiedades ópticas de un material, haciendo incidir sobre él, un haz de luz y midiendo los correspondientes ángulos de refracción. El análisis de los datos de estas mediciones y su comparación con la ec. (1), permite determinar el índice de refracción del material en estudio.

La figura 3 muestra esquemáticamente la trayectoria de un haz al atravesar un medio: el haz incide en el punto **P** y se acerca a la normal **NN'** haciendo un ángulo  $\theta_2 < \theta_1$ , cuando el haz emerge en el punto **R** se aleja de la normal haciendo un ángulo  $\theta_3 = \theta_1$ . Es obvio que midiendo los ángulos  $\theta_1$  y  $\theta_3$ , o bien la distancia **QR** se puede determinar el índice de refracción (**n**) del medio que se estudia.

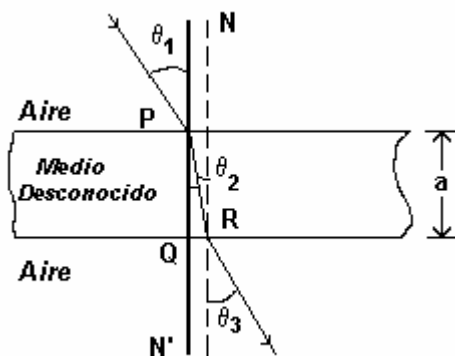


Figura 3. Trayectoria de un haz al atravesar un medio de espesor “d”, caracterizado por un índice de refracción “n”.

**Reflexión Total Interna.** Como se ha mencionado en los párrafos anteriores y se muestra en las figuras 2 y 3, cuando un haz va de un medio de menor densidad (por ejemplo el aire) a otro de mayor densidad (por ejemplo vidrio), al cruzar la frontera entre ambos el haz medio se refracta, es decir se desvía acercándose a la normal. ¿Qué pasaría si el haz incidiera desde la dirección opuesta, es decir un medio de mayor densidad hacia el medio de menor

densidad? Obviamente también se refractará, pero en este caso el haz refractado se *alejará* de la normal. De acuerdo al razonamiento anterior, si el haz incide desde un medio de mayor densidad con un ángulo cada vez mayor, el haz refractado se *alejará cada vez más* de la normal **NN'**, tal y como se muestra en la figura 4.

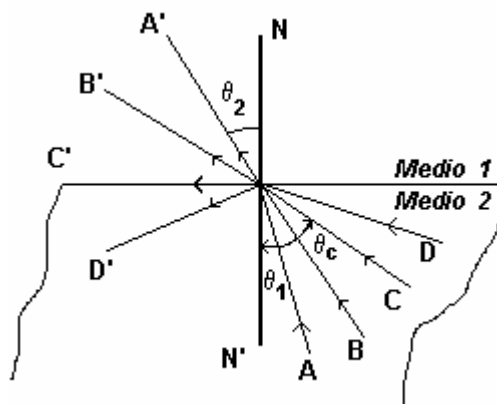


Figura 4. Reflexión total interna, un haz incide desde un medio (medio 2) hacia otro menos denso (medio 1).

Con relación a la figura 4: **A**, **B**, **C** y **D** representan los haces incidentes, mientras que **A'**, **B'**, **C'** y **D'** representan los correspondientes haces refractados,  $\theta_1$  = ángulo de incidencia,  $\theta_2$  = ángulo de refracción y  $\theta_c$  = ángulo crítico.

Como se observa en esta figura, hay un ángulo máximo de incidencia ( $\theta_c$ ), más allá del cual el haz incidente *ya no cruza la frontera entre los dos medios* y se refleja en la superficie hacia el interior; a este hecho se le llama “reflexión total interna”, al ángulo correspondiente se le llama “ángulo crítico”, y se le denota por  $\theta_c$ . Este ángulo crítico puede ser determinado “fácilmente” con la ec. (1); haciendo las correspondientes identificaciones y sustituyendo  $\theta_1 = 90^\circ$ . Este fenómeno posee una gran importancia práctica y tiene múltiples aplicaciones en diversas áreas de la ciencia y la tecnología, entre ellas en la comunicación a través de fibras ópticas, así como en medicina interna, etc... La conducción en fibras se ilustra en la figura 5.

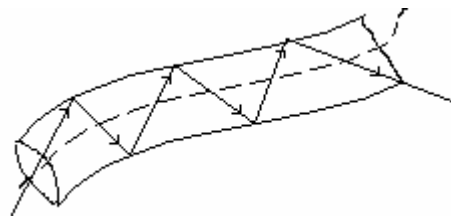


Figura 5. Iluminación y visión a través de una fibra óptica.

### MATERIAL A UTILIZAR.

- ⇒ 1 vaso de vidrio o plástico.
- ⇒ 1 Dispositivo de refracción.
- ⇒ 1 Fuente Lasser.
- ⇒ 1 Depósito rectangular de líquidos.
- ⇒ 1 Depósito semicircular de líquidos.
- ⇒ 3 Líquidos refractivos: agua, aceite, glicerina, etc...

### DESARROLLO EXPERIMENTAL.

#### 1er. Experimento: Realización de algunas experiencias empíricas.

1. Coloque el vaso de vidrio (*o plástico transparente*) sobre la mesa de trabajo e introduzca una moneda dentro de éste.
2. Con su mano saque la moneda del vaso.
3. Ahora llene el vaso con agua e introduzca nuevamente la moneda en el fondo de éste.
4. Saque la moneda del vaso.

#### GUÍA DE ANÁLISIS.

1. Describa las dificultades para extraer la moneda del vaso cuando éste se encuentra lleno de agua, comparativamente a cuando se encuentra si agua.
2. Explique el porqué de las dificultades.

#### 2do. Experimento: Determinación del índice de refracción de diversos líquidos.

1. Con la prensa fije la “base giratoria de madera” sobre su mesa de trabajo.
2. Utilizando tiras pequeñas de Maskin-Tape, fije sobre esta base la plantilla angular de 360° alineándola sobre la línea marcada en la “base giratoria de madera”.
3. Encienda el Lasser y alinee este en la dirección de la normal (0°-0°). Para efectuar esto, recuerde que puede girar la base giratoria y la base del Lasser, así como también puede desplazar transversalmente el Lasser.
4. Coloque el “depósito rectangular” de líquidos alineado el largo de este en la dirección – 90° ⇒ 90° (*ver figura 1*).
5. Cuidadosamente (*sin salpicar*) vierta agua en el depósito hasta un poco más de  $\frac{3}{4}$  de su altura.
6. Gira la “base giratoria de madera” hacia la derecha y el Lasser, ambos de tal forma que el haz incida en el punto **PI** (*ver la figura 1*) y haga un ángulo de incidencia de 10°.

7. Para checar que el haz incide en **PI** y hace un ángulo de  $10^\circ$ , utilice una hoja de papel blanco con rayas verticales o la punta de un lápiz. A continuación mida el ángulo de refracción ayudándose con la hoja rayada o la punta del lápiz, colocada en el punto de emergencia del haz (*ver la figura 1*). Anote ambos, ángulos de incidencia y de refracción en la Tabla 1.
8. Repita los puntos **6** y **7** para los restantes ángulos indicados en la Tabla 1.

# Med.	$\theta_i$	$\theta_r$	$\text{sen}\theta_i$	$\text{sen}\theta_r$
1	$10^\circ$			
2	$15^\circ$			
3	$20^\circ$			
4	$25^\circ$			
5	$30^\circ$			
6	$35^\circ$			
7	$40^\circ$			
8	$45^\circ$			
9	$50^\circ$			
10	$60^\circ$			

Tabla 1. Datos de refracción para agua natural.

9. Cuidadosamente (*sin salpicar*) retire el líquido del depósito y vacíelo en el lugar apropiado.
10. Repita el procedimiento indicado a través de los puntos **5-8** utilizando otro tipo de líquido, vaciando sus datos en la Tabla 2.



# Med.	$\theta_i$	$\theta_r$	$\text{sen}\theta_i$	$\text{sen}\theta_r$
1	10°			
2	15°			
3	20°			
4	25°			
5	30°			
6	35°			
7	40°			
8	45°			
9	50°			
10	60°			

Tabla 2. Datos de refracción para un diferente del agua natural.

### GUÍA DE ANÁLISIS.

1. Grafique los datos de  $\text{sen } \theta_1$  (**eje x**) contra  $\text{sen } \theta_2$  (**eje y**) y efectúe un análisis suponiendo un modelo lineal de comportamiento.
2. Compare la pendiente (**m**) obtenida en el inciso anterior, con la constante de la ec. (1) de la introducción teórica.
3. De la comparación anterior determine el índice de refracción de los líquidos utilizados.
4. Del análisis del experimento. Enumere 5 fuentes de error y explique la forma de minimizar estos errores.
5. Sugiera una forma diferente de efectuar este experimento.

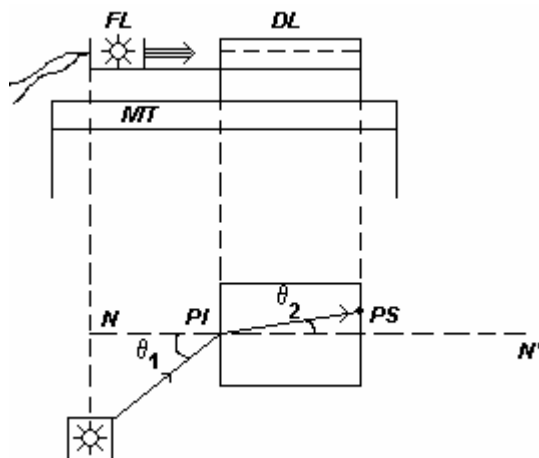


Figura 1. Determinación del índice de refracción de diversos líquidos.

MT=mesa de trabajo, FL=fuente Láser, DL=depósito de líquidos,  $\theta_1$ =ángulo de incidencia,

$\theta_2$ =ángulo de refracción, PI=punto de incidencia, PS=punto de emergencia del haz.

# Med.	$\theta_i$	$\theta_r$	$\text{sen}\theta_i$	$\text{sen}\theta_r$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Tabla. ángulos de incidencia y refracción para diversos líquidos.

### 3er. Experimento: Reflexión total interna.

1. En forma similar al experimento anterior, con la prensa fije la “base giratoria de madera” a su mesa de trabajo, procurando que quede bien nivelada, de ser necesario coloque una pequeña calza en el extremo del brazo de la base.
2. Usando pequeñas tiras de maskin-tape , fije la plantilla angular correspondiente a la base giratoria (ver figura 2).

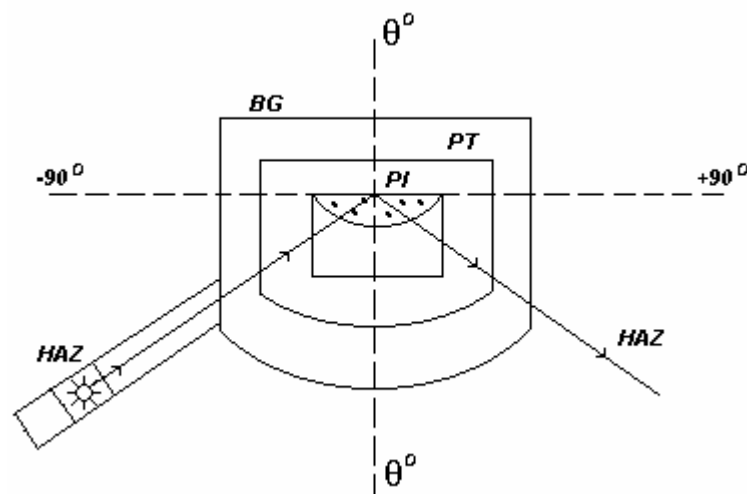


Figura 2. Reflexión total interna.

B = base giratoria de madera, PT = Plantilla y DL = Depósito semicircular de líquidos.

3. Encienda el Lasser y alinee éste en la dirección  $\theta^\circ$  \_  $\theta^\circ$ . Recuerde que aflojando la pija que sujeta el Lasser puede moverlo transversalmente.
4. Coloque sobre la plantilla angular el depósito semicircular de líquidos (**DL**) alineando su parte recta en la dirección  $-90^\circ - 90^\circ$  de la plantilla angular. Procure que el depósito quede un poco desplazado hacia la derecha de la dirección  $\theta^\circ$  \_  $\theta^\circ$  marcada en la plantilla.
5. Cuidadosamente (*sin salpicar*) vierta líquido en el depósito, hasta un poco más de  $\frac{3}{4}$  de su altura.
6. Gire hacia la derecha la “base giratoria de madera” de tal forma que el haz de luz incida sobre la superficie semicircular exterior del depósito (*figura 3*) haciendo un ángulo de  $\theta^\circ$  aproximadamente. Ahora con la punta de un lápiz o palillo BUSQUE en puntos cercanos al punto **PI** (*por el interior o exterior del depósito*) el punto real de incidencia del haz, una vez localizado éste, gire el Lasser hasta que el punto real de incidencia coincida con el punto **PI**, a continuación con una hoja de papel rayado localice el punto exterior de incidencia (**PEI**) del haz, estos dos puntos definen la trayectoria interior real que sigue el haz en el agua (*ver figura 3*), tome nota de este ángulo. Con el trozo de madera graduada localice el ángulo con el que el haz emerge del depósito y tome nota de este ángulo.

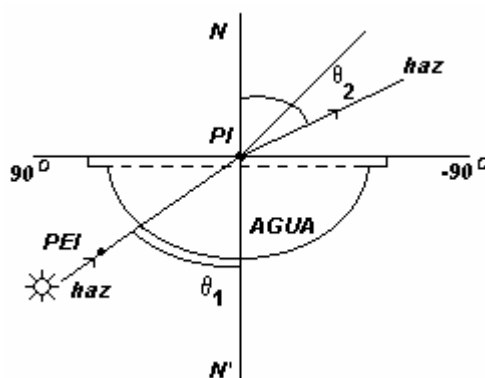


Figura 3. Puntos que definen el ángulo de incidencia interior del haz.

7. Vaya girando suavemente la base giratoria hacia la derecha a fin de ir aumentando el ángulo de incidencia exterior y repita las indicaciones dadas en el punto anterior. Para un ángulo de incidencia interior EL HAZ YA NO EMERGE del depósito sino que se refleja hacia el interior del depósito, a este ángulo de incidencia interior se le llama “ANGULO CRITICO”, tome nota de este ángulo.

8. Repita cuando menos 3 veces el experimento y ejecute un promedio con los 3 valores de ángulo crítico obtenido.

### **Referencias.**

1. Física Vol. 2. R. Resnick, D. Halliday y K. S. Krane, CECSA (1993)
2. Física Vol. 2. R. A. Serway MacGraw Hill (1997)
3. Física Vol. 2. P. A. Tipler, REVERTE (1995)

### OBJETIVOS:

- ◇ Visualizar el fenómeno de interferencia de la luz como una manifestación del carácter ondulatorio de ésta.
- ◇ Delimitar las condiciones físicas necesarias para que el fenómeno de interferencia sea visible.
- ◇ Efectuar un estudio cualitativo del fenómeno de difracción de la luz, cuando un haz de luz monocromática pasa a través de una o dos rendijas.

### INTRODUCCIÓN TEÓRICA.

Cuando entramos a un cuarto “totalmente” oscuro, pero que sin embargo se encuentra intensamente iluminado por el exterior, podemos observar una serie de fenómenos luminosos, tales como franjas circulares concéntricas, luminosas y oscuras que proyecta cualquier orificio pequeño que se encuentre en la pared, o bien líneas oscuras y luminosas que proyecta cualquier abertura pequeña colocada en la pared. Estos fenómenos ya habían sido observados por científicos en el siglo XVI, todos ellos son una manifestación del carácter ondulatorio de la luz y una consecuencia directa de la superposición constructiva o destructiva de las “ondas de luz”, es decir del fenómeno de interferencia de la luz.

En general cuando dos haces de luz de fuentes distintas inciden sobre un punto, ocurre el fenómeno de interferencia, el cual se manifiesta con áreas (*circulares, lineales, etc...*) iluminadas y oscuras las cuales corresponden a regiones de interferencia constructiva o destructiva de ondas de luz.

Sin embargo el fenómeno no es comúnmente visible, para que lo sea, es necesario que se cumplan varias condiciones: la primera de ellas es que las fuentes emitan a una sola frecuencia (*es decir que sean fuentes monocromáticas*), además la diferencia de fase entre estas fuentes debe ser constante, es decir deben ser fuentes coherentes.

En principio pudiera parecer que las condiciones anteriores son imposibles de cumplir, ya que como sabemos la luz común consta de una mezcla de frecuencias (*colores*) o longitudes de onda, sin embargo también sabemos que una fuente de luz blanca de suficiente intensidad, al colocarle un filtro de color funciona como una fuente aproximadamente monocromática. Si además hacemos incidir este haz de luz sobre un colimador que “concentre el haz” y posteriormente hacemos incidir el haz sobre una o más aberturas longitudinales

pequeñas, la luz que emerge de estas aberturas en pequeños “haces” es aproximadamente monocromática y coherente, en consecuencia cuando estos haces inciden en puntos de una pantalla colocados más allá de la aberturas, deberá observarse el fenómeno de interferencia, a través de una serie de franjas de luz y oscuridad, actualmente el “filtrado” y colimado de una fuente no es necesario, ya que existen fuentes Lasser, las cuales son monocromáticas y generalmente traen un colimador integrado. El fenómeno de interferencia se ilustra pictóricamente en las figuras 1 y 2.

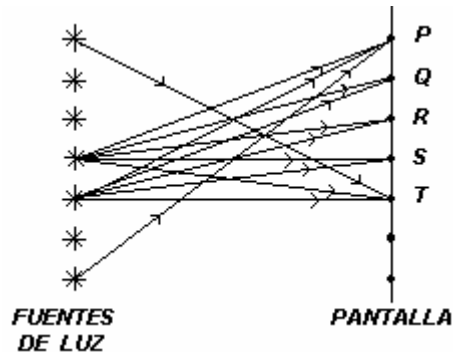


Figura 1. Fenómeno de interferencia en los puntos P, Q, R, S, T.

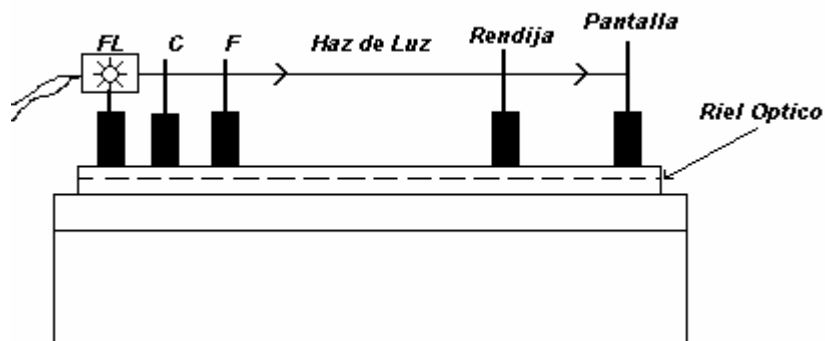


Figura 2. Fenómeno de interferencia, utilizando una fuente de luz común, es decir una fuente de luz aproximadamente monocromática.

FL = fuente de luz (*halógeno*), C = colimador y F = filtro

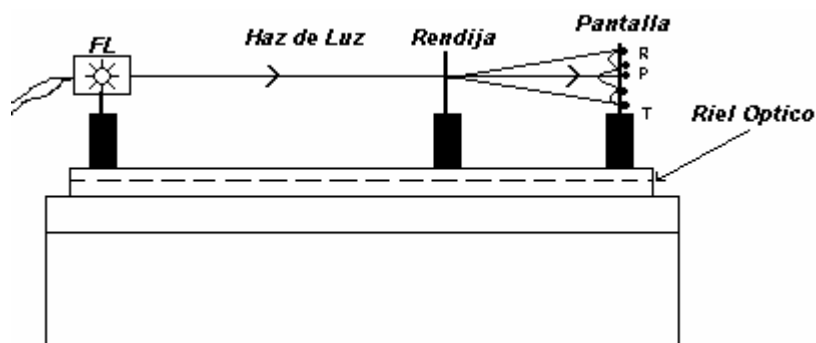


Figura 3. Representación esquemática de las áreas de interferencia de acuerdo a la intensidad de la luz. La parte central en la pantalla (*punto P*), representa un máximo de interferencia constructiva, lo cual se refleja con un máximo de intensidad.

La figura 3 representa esquemáticamente las regiones de interferencia generadas por una abertura lineal (*rendija*): el punto **P** representa el máximo mayor derivado de la interferencia constructiva del haz, **R** representa también un máximo pero de menor intensidad al anterior y así sucesivamente. En la parte baja de **P**, el punto **T** representa el correspondiente máximo simétrico del punto **R**. En las partes intermedias entre los puntos **P**, **R**, **T**, (etc.), se localizan los mínimos de intensidad, los cuales corresponden a áreas de interferencia destructiva.

#### MATERIAL A UTILIZAR:

- ⇒ Riel de madera.
- ⇒ Filtro.
- ⇒ Fuente Láser.
- ⇒ Fuente de CD.
- ⇒ Foco.
- ⇒ Colimador para foco.
- ⇒ Diafragma circular.
- ⇒ Rendija simple.
- ⇒ Mica.
- ⇒ Pantalla.

#### DESARROLLO EXPERIMENTAL.

##### 1er. Experimento: Interferencia de Ondas de luz por una abertura circular.

1. Arme el dispositivo ilustrado en la figura 4.

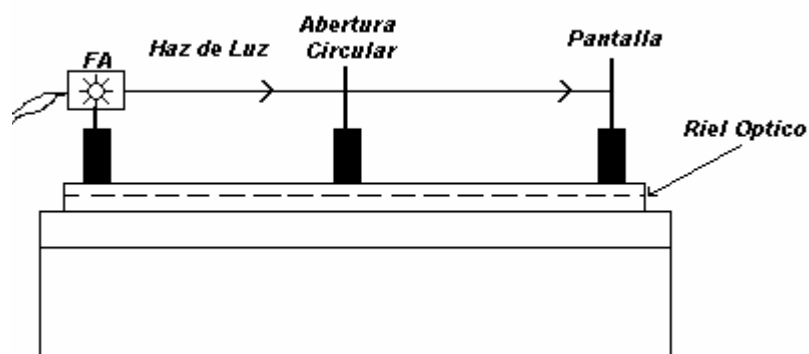


Figura 4. Interferencia con una abertura circular,  
FA = fuente de halógeno, MT = mesa de trabajo.

- a) Coloque el diafragma con la abertura circular a una distancia de 20 cm de la fuente de halógeno y la pantalla a 30 cm de ésta.
  - Encienda la fuente de halógeno y enfoque la figura de interferencia (*patrón*) que se forma en la pantalla, acercando o alejando el diafragma de la fuente de halógeno.
  - Observe y tome nota del patrón de interferencia. Cualquier duda que tenga consúltela con su profesor.
- b) Repita el experimento anterior sustituyendo el diafragma por otro que tenga una abertura circular con diámetro diferente al anterior. Tome nota de la “figura de interferencia”.
- c) Repita los experimentos anteriores sustituyendo el diafragma por una abertura longitudinal.

## 2do. Experimento: Interferencia por reflexión en superficies paralelas (*experimento de Pohl*).

1. Arme el arreglo que indica la figura 5.



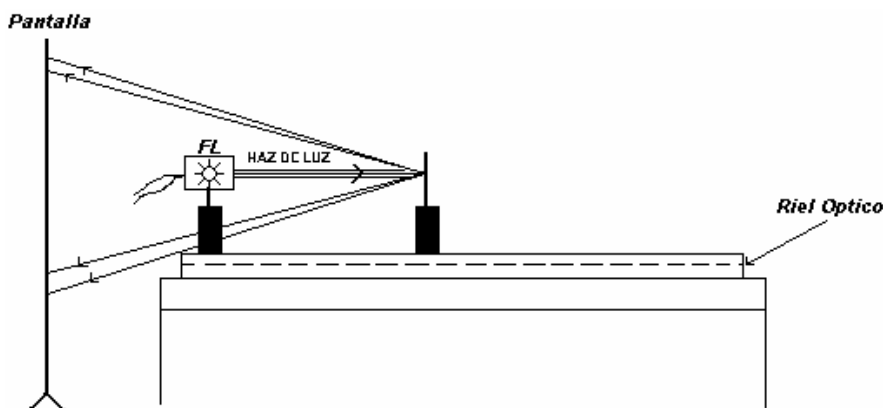


Figura 5. Experimento de Pohl: interferencia de ondas de luz originada por reflexión en superficies paralelas. MT = mesa de trabajo, FL = fuente de luz, Haz = haz de luz.

2. Encienda el Lasser y mueva la mica tratando de enfocar la figura de interferencia que se forma sobre la pantalla.
3. Repita lo anterior sustituyendo al Lasser por el foco con el colimador.

### 3er. Experimento: Interferencia por reflexión en superficies (anillos de Newton).

1. Forme el arreglo indicado en la figura 6.

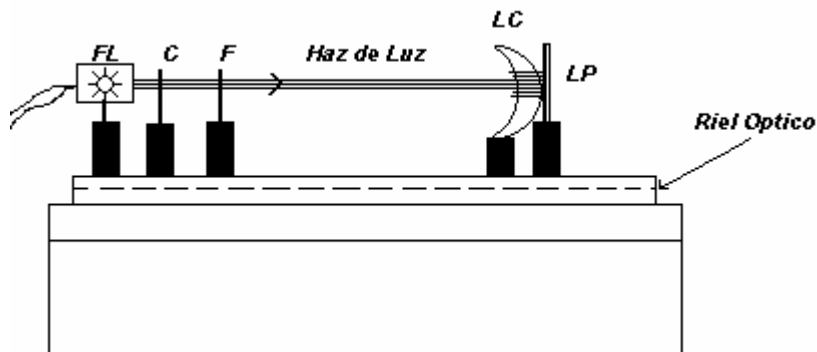


Figura 6. Interferencia por reflexión en superficies: anillos de Newton.

LC = lente cóncava, LP = vidrio plano, FL = fuente de luz, C = colimador y F = filtro.

2. Coloque en contacto la lente cóncava a la pieza de vidrio plano.
3. Encienda la fuente Lasser y observe la figura (*patrón*) de interferencia que se forma sobre la lente cóncava.
4. Repita el experimento sustituyendo la fuente Lasser por un foco (*con colimador*). Si tiene dudas, consúltelas con su profesor.

### GUÍA DE ANÁLISIS.

1. Describa detalladamente la función que desempeña cada uno de los componentes del arreglo de la figura 1.
2. ¿Cómo contribuye cada uno de los componentes anteriores a la formación del patrón de interferencia?. Explique con detalle.
3. Dé una explicación cualitativa de por qué se forma la figura (*patrón*) de interferencia en el arreglo de la figura 1.
4. Para los casos **B** y **C** del experimento 1, explique la función que desempeña cada uno de los componentes adicionales utilizados.
5. Dé una explicación cualitativa de por qué se forma el patrón de interferencia en los casos **B** y **C** del experimento 1.
6. Dé una descripción cualitativa detallada de cómo la mica interviene en la formación del patrón de interferencia que se proyecta en la pantalla. Consulte su libro de texto.
7. Dé una explicación cualitativa detallada de la función que desempeñan las lentes en la formación de los llamados anillos de Newton. Consulte su libro de texto.

### Referencias:

1. Física Vol. 2, R. Resnick, D. Halliday , & K. S. Krane, CECSA, pags. 395-436, (1993).
2. Física Tomo I (*cuarta ed.*), R.A. Serway, McGraw Hill, Pags. 1096-1148, (1997).
3. Física Vol. 2, P.A. Tipler, REVERTE (1995).

# DIFRACCIÓN DE LA LUZ POR UNA RENDIJA DOBLE

## OBJETIVOS:

- ◇ Visualizar el fenómeno de difracción de la luz como una manifestación del carácter ondulatorio de ésta.
- ◇ Visualizar cualitativamente el fenómeno de difracción de la luz por una rendija doble.
- ◇ Determinar la longitud de onda de la fuente emisora de luz, a partir de cantidades medidas en el experimento.

## INTRODUCCIÓN TEÓRICA.

De acuerdo al principio de Huygens, si un frente plano de ondas monocromáticas, incide sobre una o varias rendijas, a partir de cada una de éstas y a lo largo de todas ellas, emanarán frentes secundarios de ondas que son coherentes; al hacer incidir estos frentes secundarios sobre una pantalla, ellos habrán recorrido diferentes distancias, así que se superpondrán positiva o negativamente (*dependiendo de la relación entre sus longitudes de onda*), generando un conjunto de franjas de luz y oscuridad llamado “patrón de interferencia”, esta situación se ilustra esquemáticamente en la figura siguiente.

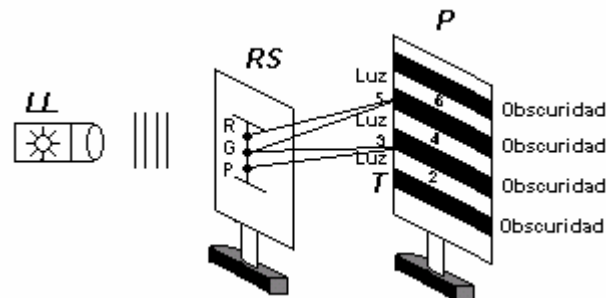


Figura 1. Patrón de interferencia de una rendija vertical simple.

Los puntos P, G, R, ... en la rendija vertical (RS) de la figura 1, funcionan como fuentes coherentes, en acuerdo al principio de Huygens, en consecuencia los haces que emanan (*por ejemplo*) de los puntos P y G e inciden sobre la pantalla a la altura de la región 3 interferirán destructivamente generando una franja de oscuridad, mientras que estos mismos haces al incidir sobre la misma pantalla en la región 4 (*por ejemplo*) interferirán constructivamente generando una región de “luz”.

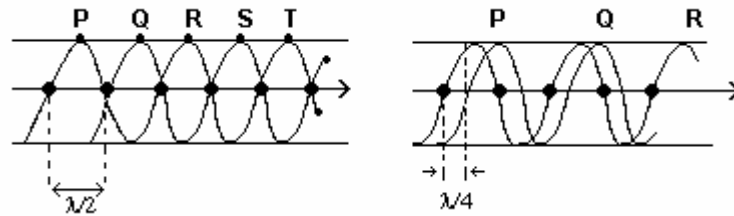


Figura 2. Interferencia de dos haces (1 y 2) con diferencias de recorrido es  $\lambda/2$  y  $\lambda/4$ .

La figura 2 muestra en detalle como interfieren dos ondas de luz **(1 y 2)** cuya diferencia en recorrido es  $\lambda/2$  y  $\lambda/4$ , cuando estas inciden sobre una pantalla.

En relación a esta figura, observe que en el primer caso ( $\lambda/2$ ) la interferencia es totalmente destructiva en los puntos **P, Q, R, S, T**, etc..., mientras que en el segundo caso ( $\lambda/4$ ), la interferencia es parcialmente destructiva en los puntos **P, Q, R**, etc... La figura 3 muestra una visión alterna del fenómeno de interferencia, en este caso ocasionada por rendijas verticales.

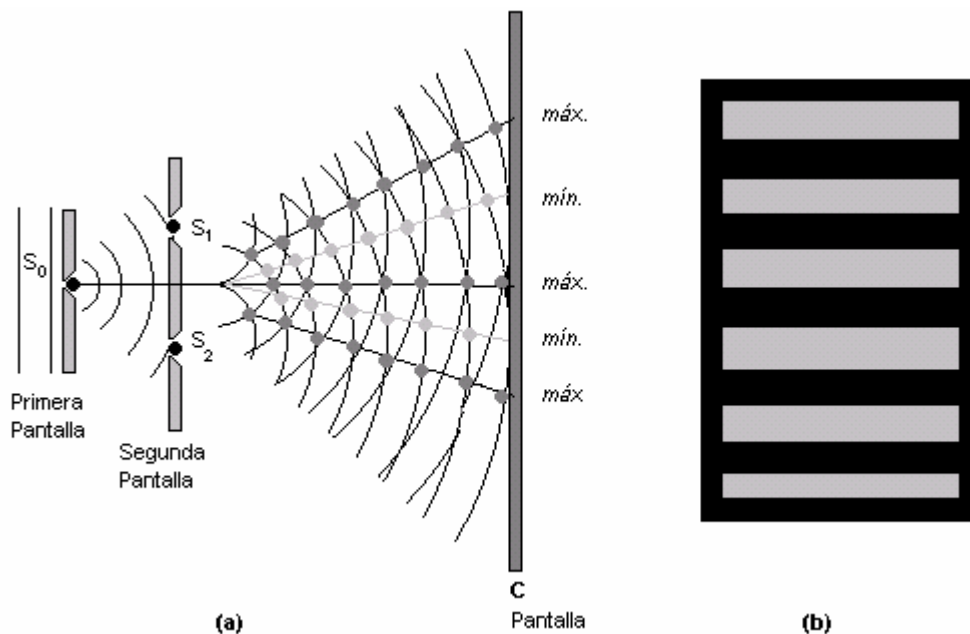


Figura 3. Difracción por dos rendijas. (a) representación pictórica y (b) patrón de interferencia sobre la pantalla.

Como se ha mencionado, la formación de las franjas de luz u oscuridad en la pantalla, es una consecuencia de la interferencia constructiva o destructiva de las ondas de luz conteni-

da en los haces que emanan de una o varias de las rendijas; para el caso de dos rendijas, puede verse experimentalmente que la separación entre las franjas de luz u oscuridad depende de la distancia entre las rendijas, así como también de la distancia entre la pantalla y las rendijas; con equipo más especializado puede mostrarse que esta separación también depende de la longitud de onda de la luz que emite la fuente; es obvio entonces que midiendo la separación entre las rendijas, entre las rendijas y la pantalla y entre las franjas oscuras o luminosas, es factible determinar la longitud de onda ( $\lambda$ ) de la luz que emite la fuente, para esto consideremos la figura 4, que muestra la difracción por dos rendijas.

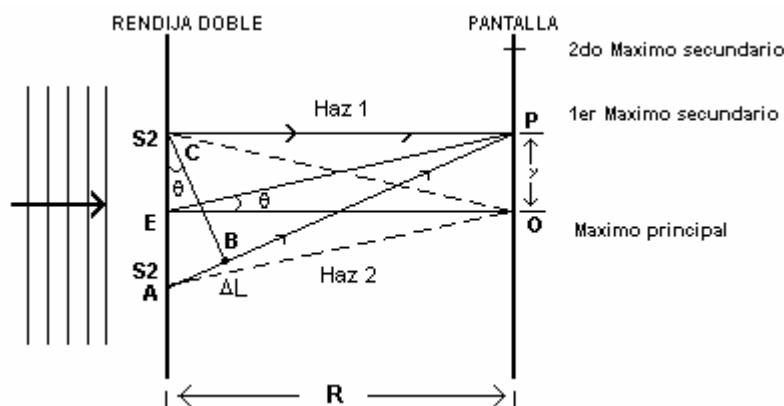


Figura 4. Difracción por dos rendijas  $S_1, S_2$  = fuentes secundarias,  $P$  = punto sobre la pantalla,  $d$  = separación entre las rendijas.

En referencia a la figura 4, los haces 1 y 2 cuando emergen en los puntos  $S_1$  y  $S_2$  están en fase, sin embargo al incidir sobre la pantalla, no necesariamente lo están, esto dependerá de la distancia que cada uno haya recorrido para alcanzar la pantalla. Así por ejemplo, cuando estos haces inciden en el punto (0), sus recorridos son idénticos, así que se superponen constructivamente generando un máximo en este punto (*máximo principal*); sin embargo cuando estos mismos haces inciden en el punto  $P$  (ver figura 4) sus recorridos son diferentes y dependiendo de la magnitud de esta diferencia los haces se superpondrán constructivamente.

De acuerdo a lo anterior, cuando los haces 1 y 2, inciden en el punto  $P$ , los puntos  $A, B$  y  $C$  forman un triángulo rectángulo y por construcción los ángulos  $ABC$  y  $OEP$  son igual; por tanto la diferencia de recorrido entre los haces 1 y 2 es  $\Delta L = d \sin \theta$  siendo  $d$  la separación entre las dos rendijas. Si la diferencia en recorrido es cero (*punto 0*) o un múltiplo entero de la longitud de onda de los haces 1 y 2, las ondas estarán en fase al llegar a la pantalla y tendremos máximos de interferencia constructiva (*franjas de luz*), es decir:

$$\Delta L = d \sin \theta = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (1)$$

Supongamos que en **P** tenemos el primer máximo secundario de interferencia constructiva (**m = 1**), entonces en acuerdo al arreglo geométrico:

$$\frac{Y}{R} = \tan \theta \quad \text{y como } R \gg d \quad \theta \text{ es pequeño, así que } \tan \theta \approx \sin \theta \therefore \text{ si sustituimos } m = 1 \text{ y } \tan \theta \approx \sin \theta, \text{ obtenemos } \lambda = \frac{dy}{R}, \text{ o bien } \gamma = \frac{\lambda}{d} R \quad (2)$$

Una deducción semejante puede efectuarse para los máximos de interferencia destructiva (*franjas de oscuridad*), en cuyo caso  $m \rightarrow n + \frac{1}{2}$  ( $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ). El primer máximo de interferencia destructiva ocurre para  $n = 0$ , en el punto medio entre **O** y **P**. Para este caso la expresión correspondiente a **(2)** es:

$$Y = \frac{\lambda}{2d} R \quad (3)$$

Las expresiones **(2)** o **(3)** permiten determinar la longitud de onda de la fuente, midiendo la distancia a la que se encuentran los máximos o mínimos de intensidad luminosa (**y**) y la distancia de separación (**R**) entre las rendijas y la pantalla.

#### MATERIAL A UTILIZAR.

- ⇒ 1 Riel óptico de madera.
- ⇒ 1 Fuente de luz monocromática (laser) con base.
- ⇒ 1 Rendija sencilla con soporte.
- ⇒ 1 Rendija doble con soporte.
- ⇒ 1 Pantalla (*pequeña*) con graduación y soporte.
- ⇒ 1 Flexómetro y calibrador vernier.

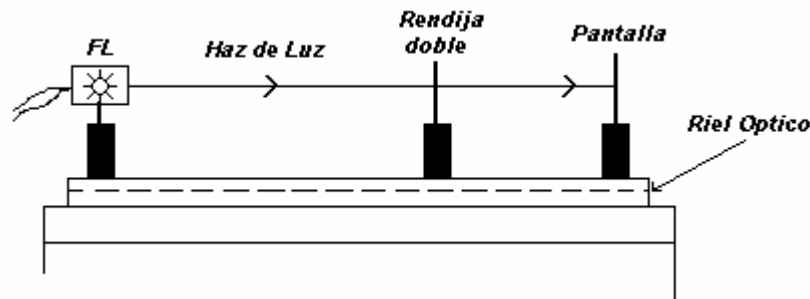


Figura 5. Arreglo experimental para difracción por una rendija doble.  
MT = mesa de trabajo y FL = fuente Láser.

## DESARROLLO EXPERIMENTAL.

### 1er. Experimento: Difracción por una rendija doble usando una Fuente Láser.

1. Ensamble el dispositivo que ilustra esquemáticamente la figura 5, colocando la fuente al inicio del riel, la pantalla al final y la rendija a la mitad de la distancia entre ambos.
2. Desplace la rendija hacia la fuente, tratando de enfocar el patrón de franjas de interferencia que se forma, tome como referencia esta posición.
3. Desplace la pantalla unos 30 cm hacia las rendijas.
4. A continuación mida con el calibrador Vernier (*0 usando las graduaciones de la pantalla y una lupa*) la separación entre la franja central de luz (*máximo principal*) y la primera franja superior de luz (*1er máximo secundario*) en el patrón de interferencia.
5. Ahora vaya separando la pantalla de las rendijas y cada 5 cm tome nota nuevamente de la distancia de separación entre las franjas de luz.
6. Repita el punto anterior al menos 12 veces, anotando sus datos en la Tabla 1.

	R (m)	Y (m)
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		

Tabla 1. Variación de la distancia de separación entre las franjas del patrón de interferencia (Y) al variar la distancia (R) entre las rendijas y la pantalla.

### GUÍA DE ANÁLISIS.

1. Suponga una relación lineal de **Y** con **R**, en base a esto determine la correspondiente ley física e interprete cada uno de los parámetros que aparecen en ella.
2. Compare la relación obtenida en (1) con la ecuación (4) de la introducción teórica.
3. En base a esta comparación, determine la longitud de onda ( $\lambda$ ) de la luz que emite la fuente.
4. Tome como referencia el valor teórico de esta longitud de onda ( $\lambda$ ) y determine el error experimental asociado al valor obtenido.
5. ¿Qué tan confiable es el valor de  $\lambda$  obtenido?. Efectúe una discusión al respecto.
6. Explique como se podría mejorar el experimento para así obtener un mejor valor de  $\lambda$ . Justifique cada una de sus respuestas.



## Referencias.

1. Física Vol. 2, R. Resnick, D. Halliday & K.S Krane, CECSA (1993).
2. Física Vol. 2, R. A. Serway MacGraw Hill (1997)
3. Física Vol. 2. P. A. Tipler, REVERTE (1995)

### OBJETIVOS:

- ◊ *Al final del experimento el alumno identificará, describirá y conocerá algunas de las características de la polarización de la luz.*

### INTRODUCCIÓN TEÓRICA.

La polarización es un fenómeno físico peculiar para ondas transversales; esto es, ondas que vibran en una dirección perpendicular a su dirección propagación; recordando que la luz es una onda electromagnética transversal; o sea que una onda de luz es el equivalente a una partícula vibrando “hacia arriba y abajo” en un plano vertical.

Ordinariamente un rayo de luz consiste en una mezcla de ondas vibrando en todas las direcciones perpendiculares a la dirección de propagación. Si por alguna razón la vibración permanece constante en dirección, entonces se dice que la luz está **polarizada**; por lo que se dice que la polarización de la luz es la orientación de la vibración de ondas de luz en simple plano.

Se ha encontrado que la luz reflejada de alguna forma tiene algún grado de polarización; por lo que la luz puede ser polarizada por una doble reflexión; luego cualquier sustancia transparente tiene la propiedad de refracción o sea que en cierto grado es un polarizador. En estas condiciones un rayo de luz no polarizada se puede polarizar por medio del **prisma de Nicol**; aclarando que este prisma es un dispositivo que separa un rayo de luz incidente en dos rayos de luz por doble refracción.

En algunos casos la luz se polariza mediante un cristal de turmalina (sustancia de doble refracción). Otro método muy común usando para polarizar rayos de luz es el uso de placas de material transparente. A su vez cuando un rayo de luz no polarizada pasa sucesivamente a través de dos materiales transparentes (dos polarizados), cuyas direcciones de polarización son mutuamente perpendiculares, el rayo de luz se bloquea completamente.

Existen otras sustancias que polarizan la luz presentándose los fenómenos llamados: Polarización Circular y Polarización Elíptica.

### **MATERIAL A UTILIZAR.**

- ⇒ Fuente de luz monocromática.
- ⇒ Fuente de corriente directa regulada con escala de 0 a 20 volts.
- ⇒ Porta fuente.
- ⇒ Resistencia de  $100\Omega$
- ⇒ Cables de conectores (4), caimán banana.
- ⇒ Multímetro con escala de mA para C.D.
- ⇒ Polarizadores lineales de luz (2).
- ⇒ Vidrios con porta vidrio (4).
- ⇒ Pantalla.
- ⇒ Polariscopio (es recomendable).

COMENTARIO: Las sustancias que afectan la luz polarizada que pasa a través de ella, son llamadas soluciones óptimamente activas

### **PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.**

#### **Primera parte.**

1. Coloque la fuente de luz monocromática como se ilustra en la figura 1 y posteriormente haga la conexión indicada en la misma figura, cuidando que la corriente no rebase los 30mA.

Figura PO-1

2. Haga sus observaciones de lo que ocurre en la pantalla (micropantalla), variando la abertura en el colimador, así como la distancia de la fuente a la pantalla.
3. Colocar un polarizador entre el colimador y la pantalla, posicionándolo de tal forma que la nitidez sea aceptable. Haga anotaciones de lo que observe.
4. Coloque otro polarizador a una distancia del primero y analice los cambios observados, haciendo los giros en polarizador (segundo) hasta que se noten cambios.
5. Con el juego de placas polarizadas colocadas en el lugar de los polarizadores, repita el inciso 4 y anote sus observaciones. Haga el experimento con placas polarizadas de 80 y 100 hilos.

### Medición del ángulo de Brewster.

1. Colocar la fuente luminosa como se muestra en la figura 2, de tal forma que se genere una reflexión y sea posible medir los ángulos  $\theta_i$ , (ángulo de incidencia) y  $\theta_r$  (ángulo reflejado).

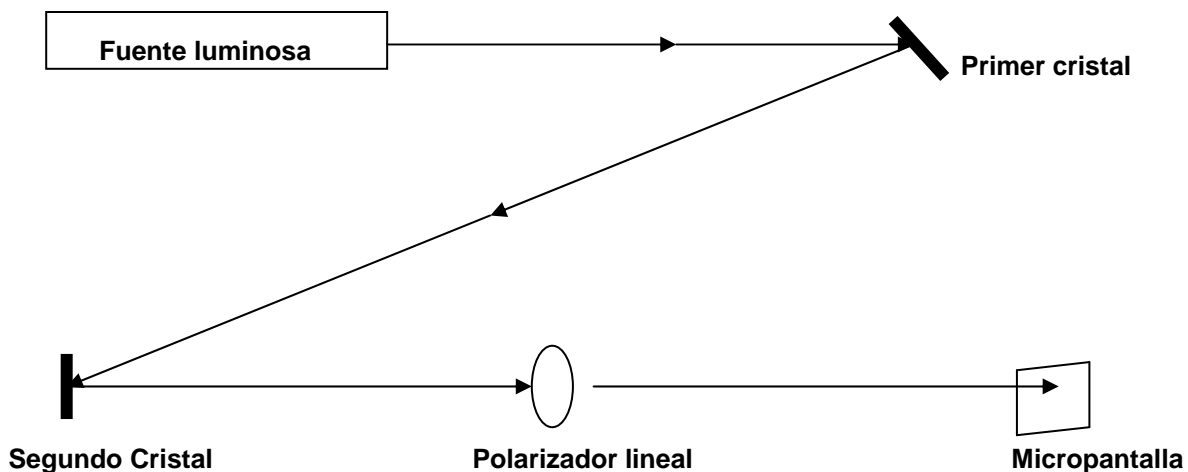


Figura PO-2

2. Colocar un polarizador lineal en la trayectoria del haz de reflejado y variar el ángulo de incidencia moviendo la fuente, hasta que no se observe el haz reflejado a través del polarizador lineal, en esa posición se dice que el haz está linealmente polarizado ( $\theta_i = \theta_p$ ), llamado ángulo de Brewster.

### Polarización por reflexión.

1. Coloque los vidrios (cristales) como se muestra en la figura 3, de tal forma que se presenten reflexiones del haz hasta que en la pantalla no se observe haz luminoso. Ano-

te sus observaciones.

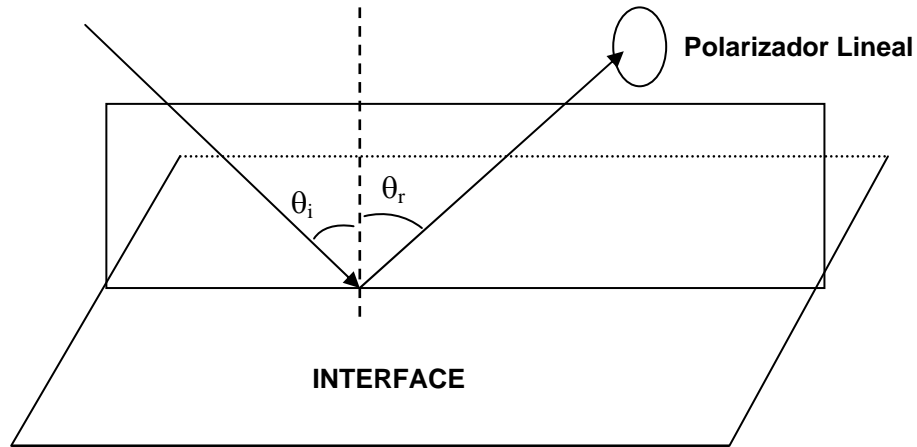


Figura PO-3

2. Puede colocar algunos otros cristales de reflexión modificando la presentación aquí considerada, anotando siempre sus observaciones.

### Cuestionario.

1. En el primer experimento ¿se observó algún detalle en la micropantalla?

---



---

2. Cuando se colocó el polarizador lineal entre el colimador y la pantalla, se hizo variar el ángulo en el polarizador lineal y como la luz se propaga en forma ondulatoria. Anote sus conclusiones.

---



---


3. Indicar el trabajo (papel) que realizan los polarizadores lineales.

---




---


4. Nuevamente tomando en consideración el carácter ondulatorio de la luz, indicar el trabajo desarrollado por las placas polarizadoras de hilos.

  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_


5. Mediante las observaciones en el experimento número 2, explicar lo que sucede con el haz de la luz al ser reflejado y refractado en la interfase.

  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_


6. Indicar el valor medido del ángulo  $\theta_p$  y explicar en forma resumida lo realizado en este experimento.

  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

7. Indica tus conclusiones considerando la representación ondulatoria de la propagación de la luz en el proceso de reflexión múltiple.

  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

8. En forma resumida, explicar el fenómeno de polarización de la luz.

  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

### **Bibliografía.**

1. Halliday Resnick Krane, Física Vol. 2, CECSA, reimpresión 1996.
2. Hecht Zayac, Óptica, Fondo Educativo interamericano 1976.
3. Leybold Didactic GMBH, Catálogo General de Física 1997.
4. Bruno Rossi, Óptica, Addison Wesley Publishing Company Inc 1962.
5. Leybold Didactic GMBH, General Catalogue of Physics Experiments 1998.
6. Meisa México Didáctica, Manuel de Experimento de Óptica 1974.

7. L. R. Dress, Polarización of lighth, página web de internet, Julio 1999.

### 1. GENERALES:

- ♦ Número y nombre del experimento.
- ♦ Salón, día y hora.
- ♦ Fecha de realización del experimento.
- ♦ Fecha de entrega del reporte.
- ♦ Nombre de los compañeros de equipo.
- ♦ Nombre de los profesores.

### 2. OBJETIVOS:

Escribe los objetivos que consideres más importantes, y que se logran a través de la realización de la práctica.

### 3. INTRODUCCION TEORICA:

Efectúa un resumen de la teoría que consideres necesaria para explicar los fenómenos realizados.

### 4. EQUIPO Y MATERIAL UTILIZADO:

Procura dar especificaciones sobre el equipo, tales como: nombre, marca y rango de los instrumentos, etc...

### 5. PROCEDIMIENTO SEGUIDO:

Indica el procedimiento seguido al efectuar la práctica, explicando las razones por las cuales hayas diferido con el indicado, menciona el rango en que fueron utilizados los instrumentos.

### 6. DATOS:

Presente todos los datos originales en forma tabular donde sea necesario. Rotula las columnas incluyendo sus Unidades. Incluye en esta columna tanto los datos usados como los descartados y da la razón por la cual fueron descartados.

### 7. GRAFICAS:

Grafica tus datos en papel milimétrico (o en impresión de PC), rotulando los ejes incluyendo unidades; dibuja curvas continuas a través de los puntos que representan las curvas ajustadas, cuando las haya. Si utilizas una sola hoja de gráfica para representar dos



curvas, represéntalas con líneas distintas, interrumpidas y llenas, o distínguelas por color.

#### **8. CALCULOS:**

Deriva las fórmulas utilizadas, los resultados deben ser presentados en forma tabular. No en operaciones aritméticas extensas.

#### **9. COMPARACION:**

Compara tus resultados con los correspondientes a la bibliografía o valores conocidos y esperados. Si tus resultados difieren con esto, discute sobre las posibles razones que hayan influido.

#### **10. ERRORES:**

Estima el error de los números usados en tus cálculos, utiliza consistencia de datos o precisión en los instrumentos de medidas. Menciona las fuentes de error.

#### **11. PREGUNTAS:**

Responde todas las preguntas que aparezcan en el instructivo y las que te presente el Profesor durante el desarrollo de la práctica.

#### **12. SUGERENCIAS:**

Presenta alguna sugerencia de la manera en que pudieran obtenerse mejores resultados con otro procedimiento.

#### **13. REFERENCIAS:**

Efectúa una lista al final del reporte de aquellas referencias sobre cualquier información que hayas utilizado durante el desarrollo del reporte tales como: valores aceptados, fórmulas, material de texto, etc... dando el nombre completo del libro o revista y los autores del mismo.

## APÉNDICE "A"

En este apéndice se muestran los índices de Aceptación (I.A.) que se utilizan para determinar la linealidad de la relación entre dos cantidades físicas que se cuantifican. Estos índices se calcularon con ayuda de las tablas del 0.05 de probabilidad de la función de distribución de Fisher contenidas en el software EXCEL de Microsoft, con los grados de libertad de  $n - 2$  y  $n*(k - 1)$ , donde  $n$  = número de parejas de valores y  $k$  = número de repeticiones.

Para obtener el Índice de Aceptación, basta con encontrar el cruce del renglón correspondiente al número de parejas de datos, con la columna correspondiente al número de repeticiones.

$$F_{0.05}^{1} [n - 2, n*(k - 1)] = I.A.$$

Parejas de Valores (n)	Número de Repeticiones (k)			
	2	3	4	5
5	5.409	3.708	3.287	3.098
6	4.534	3.259	2.928	2.776
7	3.972	2.958	2.685	2.558
8	3.581	2.741	2.508	2.399
9	3.293	2.577	2.373	2.277
10	3.072	2.447	2.266	2.180
11	2.896	2.342	2.179	2.101
12	2.753	2.255	2.106	2.035
13	2.635	2.181	2.044	1.978
14	2.534	2.118	1.991	1.930
15	2.448	2.063	1.945	1.887
16	2.373	2.015	1.904	1.849
17	2.308	1.972	1.867	1.816
18	2.250	1.934	1.835	1.786
19	2.198	1.899	1.805	1.759
20	2.151	1.868	1.778	1.734

### Proceso de los Tres Pasos

#### 1er Paso. Inspección Visual.

Determine, mediante una inspección visual, la tendencia que presentan los puntos en la gráfica de dispersión: **Tendencia: Lineal o No Lineal.**

#### 2° Paso. Inspección Estadística.

Dada la tabla de datos, determinar:

a) La varianza en las ordenadas  $\sigma_Y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} \sigma_{Yi}^2$

b) La varianza de los valores respecto a la línea de mejor ajuste

$$\sigma_L^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^{i=n} (\hat{y}_i - \bar{y})^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^{i=n} (m * X_i + b * -\bar{y})^2$$

Si  $\sigma_L^2 \leq IA \sigma_Y^2$  se dice que los datos presentan una tendencia lineal.

Si  $\sigma_L^2 > IA \sigma_Y^2$  se dice que los datos presentan una tendencia que es diferente a la lineal.

En caso en que las dos inspecciones anteriores resulten como de **Tendencia Lineal**, aplicar el tercer paso. En caso contrario, aplique el paso de la **Transformación**.

#### 3er. Paso. Aleatoriedad en los Puntos Graficados

- ◇ Trazar la línea de mejor ajuste sobre la gráfica de Dispersión y visualizar la ubicación de los puntos graficados respecto a dicha línea.
- ◇ Si la ubicación se considera aleatoria o los puntos están sobre la línea, entonces se dice que existe una relación lineal entre las cantidades consideradas, dada por la línea de mejor ajuste y se termina el proceso de los tres pasos.
- ◇ Si la ubicación se considera que no es aleatoria, continuar con el paso de la Transformación con **Z = Ln Y, W = Ln X**.

#### Paso de la Transformación.

Consiste en realizar una transformación de los datos originales (X,Y) en datos (X,Z) aplicando una transformación sólo a los valores de Y o (W,Y) aplicando una transformación sólo a los valores de X o (W,Z) aplicando una transformación a ambos valores y seguir el procedimiento de los tres pasos, para determinar la existencia de una relación lineal entre las cantidades consideradas.