

# Experimentos de Física



**Salvador  
Galindo**

Instituto  
Nacional de  
Investigaciones  
Nucleares

CONACYT

**F E L A S O F I**  
FEDERACIÓN LATINOAMERICANA  
DE SOCIEDADES DE FÍSICA

**SMF**

## DEDICATORIA

Al Ing. Roberto Pulido García quien fue mi maestro en la preparatoria.  
Con el optimismo de encontrarlo algún día, para darle las gracias personalmente.

*"No profit grows where no pleasure is ta'en;  
In brief, sir, study what you must affect."*  
The Taming of the Shrew

<b>Contenido</b>		<b>Página</b>
	Contenido.....	<i>i</i>
	Introducción.....	<i>iv</i>
<b>Parte 1 Enunciados</b>		
E1	El tubo de Sandor Mikola.....	3
E2	El péndulo bifilar.....	5
E3	Determinación del valor de la aceleración de la gravedad.....	6
E4	Determinación indirecta del área.....	6
E5	Determinación indirecta del radio de curvatura de un espejo cóncavo esférico.....	7
E6	Determinación del volumen de una habitación..	7
E7	El movimiento de un lago.....	7
E8	Medición de la densidad de un líquido.....	9
E9	La masa de una esferita.....	10
E10	Medición de la densidad de una barrita de madera.....	11
E11	El volumen de un gas.....	11
E12	Latas con perforaciones en sus fondos.....	11
E13	Comparación de la intensidad de la luz entre dos focos incandescentes.....	12
E14	Medición de la intensidad de la luz transmitida por una placa de vidrio.....	14
E15	Determinación de la curva de histéresis de un material.....	14
E16	Medición de la tensión superficial del agua.....	15
E17	Período de oscilación de una columna de agua.....	17
E18	Difracción con un disco compacto. (CD o CD-ROM).....	19
E19	Simulación de la dispersión de la luz por contaminación atmosférica.....	21
E20	Un cerillo que se dobla.....	23

---

## Parte 2 Sugerencias

E1-E3.....	27
E4-E10.....	28
E11-E16.....	29
E17-E20.....	30

## Parte 3 Soluciones y comentarios

E1.....	35
E2.....	39
E3.....	45
E4.....	48
E5.....	50
E6.....	53
E7.....	55
E8.....	58
E9.....	60
E10.....	64
E11.....	67
E12.....	69
E13.....	72
E14.....	75
E15.....	78
E16.....	80
E17.....	83
E18.....	87
E19.....	91
E20.....	93

## Parte 4 Tratamiento de errores

4.1	La estimación de errores experimentales	
	4.1.1 Introducción.....	99
	4.1.2 Errores sistemáticos y aleatorios, precisión y exactitud.....	100
	4.1.3 Medición de cantidades físicas.....	101
	4.1.4 Propagación de errores.....	101

## CONTENIDO

---

4.2	Tratamiento estadístico de datos	
4.2.1	Introducción.....	105
4.2.2	Distribución de medidas.....	107
4.2.3	Distribuciones continuas.....	109
4.3	La desviación estándar.	
4.3.1	Error estándar en una sola observación.	113
4.3.2	Error estándar en la media.....	114
4.3.3	Relación entre $\sigma_m$ y $\sigma$ .....	115
4.3.4	Cálculo de $\sigma$ y $\sigma_m$ .....	116
	4.3.4.a Ejemplo de aplicación	118
4.4	Incertidumbre en funciones	
4.4.1	Cálculo de propagación de errores.....	119
	4.4.1.a Ejemplo de aplicación.....	123
4.4.2	Relaciones entre errores estándar.....	124
4.5	Ajuste de líneas rectas.	
4.5.1	El método de mínimos cuadrados.....	125
	4.5.1.a Ejemplo de aplicación.....	127

### **Anexos**

A1	Prefijos de unidades del sistema internacional.....	131
A2	Referencias y lecturas recomendadas .....	133

*En mis tiempos de estudiante solía correr el siguiente comentario.*

*Si el experimento huele mal es de química.*

*Si el experimento se mueve, es de biología pero,*

*si el experimento "falla" entonces es de física.*

## **Introducción.**

El objetivo de la física es el encontrar las leyes que rigen el universo en el que vivimos. Para este propósito la física sigue métodos deductivos e inductivos. El método experimental abarca a ambos.

Generalmente el método experimental es enseñado al alumno cuando éste se halla cursando sus estudios de nivel medio superior, esto es, en los años inmediatos al ingreso a un tecnológico o universidad. La manera habitual cómo se enseña el método cubre dos aspectos.

El primero se refiere a las "demostraciones" que son realizadas por el instructor de la materia y tienen como objetivo la demostración cualitativa y a veces cuantitativa de fenómenos físicos. Este aspecto permite reforzar los conocimientos adquiridos por los estudiantes en las lecciones de orientación teórica. El segundo requiere de los alumnos una intervención directa en los experimentos propuestos por el instructor del laboratorio. Este aspecto tiene como objetivo reforzar en el educando una aptitud para aplicar los procesos lógicos y una capacidad para extraer conclusiones de experiencias prácticas.

La manera tradicional de enseñar este segundo aspecto es el de proporcionar al alumno instructivos detallados conocidos en las escuelas como "protocolos" que le indican paso a paso la manera en que debe desarrollar determinado experimento.

El surgimiento de estos protocolos se debe en parte al compromiso que existe para exponer a todos los estudiantes a los mismos procesos de aprendizaje. De esta manera los "protocolos" se centran en exponer reglas e instrucciones a clases enteras de estudiantes y

examinar su grado de comprensión. Como consecuencia el contenido de los protocolos a veces resulta ser más parecido a un recetario de cocina que a un texto científico y el objetivo del laboratorio se convierte en comprobar si la receta tuvo el resultado deseado. De ésta manera los experimentos resultan ser aburridos y dan la sensación de que no debería haber en este mundo físicos experimentales. Lo peor tal vez consista en que se olvida el fomentar en los educandos la capacidad de resolver problemas, la capacidad de pensar en forma distinta, de alentar el pensamiento individualista, divergente y autosuficiente. Características todas ellas del quehacer científico. La tarea del laboratorio se convierte entonces en el mejor de los casos en la de "instrucción" en vez de la "educación". Ante esta situación, se requiere para los laboratorios de un camino distinto que fomente en los estudiantes las características del verdadero quehacer científico.

La estrategia de la presente obra es la de presentar una recopilación de problemas experimentales con algunas de las siguientes características:

1. Los problemas carecen de largas instrucciones.
2. La mayoría de los problemas requiere de utensilios ordinarios para su realización por lo que se espera que no resulten una carga económica para las escuelas.
3. Se hallan acomodados en cuatro secciones.
  - La primera presenta el enunciado del problema y eventualmente algunos comentarios sobre el mismo.
  - La segunda presenta una serie de sugerencias que constituyen una ayuda para aquellos alumnos que no pueden en una primera instancia "resolver" el problema.
  - La tercera presenta las soluciones detalladas y algunos comentarios que pueden ser de interés tanto a estudiantes como a maestros.
  - La cuarta es un compendio o breviario referente a la teoría de errores

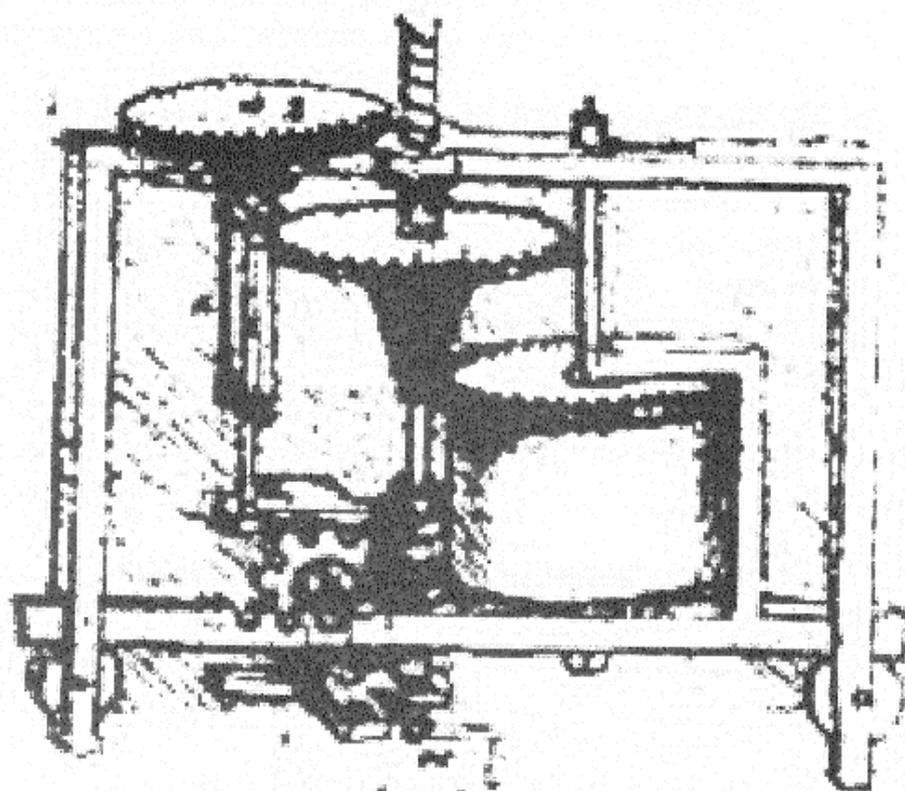
Esta recopilación de problemas son el resultado de 10 años de experiencia del autor como organizador de las Olimpiadas Nacionales de Física de México. Algunos de los problemas aquí presentados han sido utilizados en las competencias estatales, nacionales, iberoamericanas e internacionales.

El autor agradece el apoyo recibido por parte del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, que a través de sus autoridades, siempre le han brindado todas las facilidades para la realización de las actividades en las olimpiadas. Así mismo se extiende el agradecimiento a la Sociedad Mexicana de Física A. C. por su constante y decidido soporte al programa de las olimpiadas. Tanto la Secretaría de Educación Pública como el CONACYT han brindado su apoyo económico. Nuestro reconocimiento a ellos también.

Esta publicación es posible gracias al patrocinio de la Federación Latinoamericana de Sociedades de Física (FELASOFI).

Salvador Galindo,  
Centro Nuclear "Dr. Nabor Carrillo Flores"  
2001

## Parte 1



*[Faint, illegible handwritten text, possibly bleed-through from the reverse side of the page.]*

## Enunciados

### El tubo de Sandor Mikola

Clave: *Velocidad Terminal*

E1

Sugerencia  
p.27  
Solución  
p.35

Hay ocasiones en las que nos parece inútil realizar un experimento ya que consideramos que el resultado que se va a obtener se conoce de antemano. Tal es el caso del experimento conocido como "el tubo de Sandor Mikola". El experimento recibe el nombre de un maestro húngaro de física de la primera mitad del siglo XX.

El experimento consiste en medir la velocidad de una burbuja de aire al moverse dentro de un tubo lleno de agua. Dicho tubo deberá estar inclinado con respecto a la horizontal. La burbuja es producida en el extremo inferior del tubo introduciendo aire mediante una aguja. La burbuja comenzará a subir por la columna y muy pronto alcanzará una velocidad uniforme conocida como velocidad terminal. El objetivo del experimento es el encontrar para cual ángulo de inclinación con la horizontal, la velocidad terminal alcanza su máximo valor.

La respuesta "obvia" es cuando la columna forma un ángulo de  $90^\circ$  grados con respecto al plano horizontal. Investigue si la respuesta "obvia" corresponde al resultado del experimento.

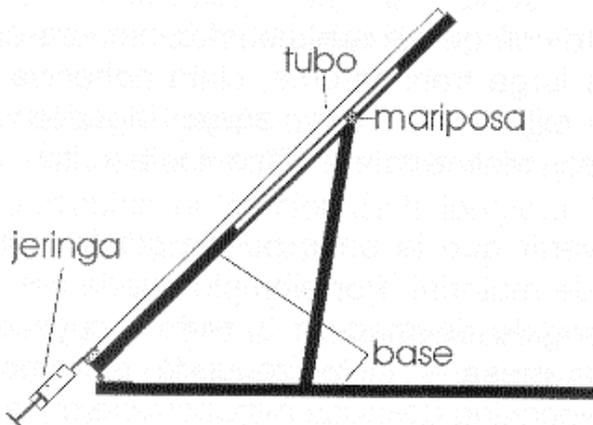


Figura 1  
Arreglo  
experi-  
mental

Para realizar el experimento podemos utilizar un tubo de plástico como el que sirve a los albañiles para "sacar niveles". La columna de agua se forma al llenar dicho tubo largo y

transparente. Uno de los extremos del tubo es sellado con un pequeño tapón de hule de diámetro adecuado.

Entre la base del tubo y el tapón se introduce una aguja hipodérmica unida a una jeringa que sirve para producir una burbuja de volumen controlado (ver figura 1).

Con la idea de mantener el tubo de plástico recto, éste se fija a una tira de madera. La tira de madera a su vez se une por su extremo al extremo de otra tira del mismo material por medio de una bisagra. Esta segunda tira servirá como la base del dispositivo.(figura1).

Para poder variar la inclinación del tubo con respecto a la horizontal la base tiene dos tablitas adicionales a ambos lados de la misma. Tanto las tablitas como la base tienen una perforación por las que pasa un perno que permite su movimiento. Las tablitas en su otro extremo también están perforadas y atravesadas por otro perno en cuyo extremo roscado se atornilla una tuerca del tipo mariposa. Este segundo perno se desliza dentro de una ranura en la primera de las tiras de madera y mediante su sujeción, con la tuerca de mariposa, se selecciona la inclinación de la columna de agua.

El equipamiento con que el que usted cuenta es el siguiente: Una manguera larga transparente, cinta adhesiva, una regla graduada en milímetros, una aguja hipodérmica, papel milimetrado, un cronómetro y la base ya descrita.

Queremos advertir que la base puede ser improvisada con cualquier tipo de material. Por ejemplo puede ser una simple tabla plana y rígida de madera o cartón, cuyo extremo se apoye en una mesa y cuyo segundo extremo se eleve mediante la colocación de libros a manera de cuñas.

### El péndulo bifilar

Clave: Movimiento oscilatorio, propagación de errores

E2

Sugerencia

p.27

Solución

p.39

El péndulo bifilar es un dispositivo consistente en una barra larga y delgada a la cual están sujetos dos hilos largos de los que cuelga la propia barra. La figura 2 muestra un péndulo bifilar.

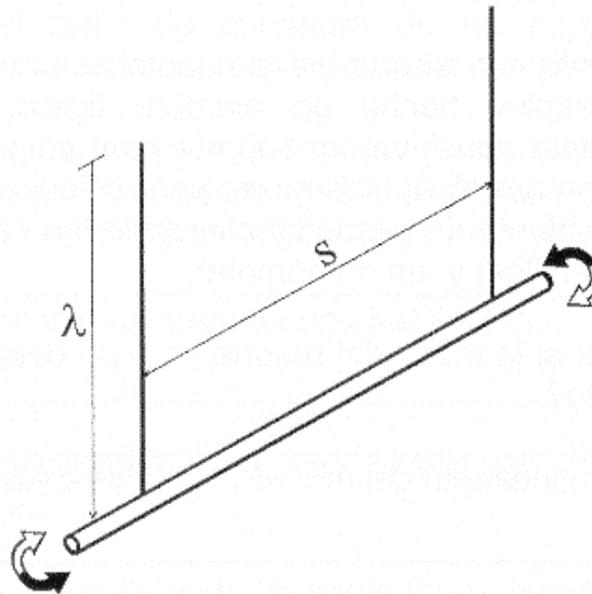


Figura 2  
Arreglo  
experi-  
mental

Una de las formas en las que puede ponerse a oscilar este tipo de péndulo es aquella en la que el plano de oscilación es perpendicular a los dos hilos. Lo anterior implica que las oscilaciones deben ser de pequeña amplitud porque de otra manera los extremos de la barra se elevarían considerablemente sobre el plano de oscilación.

El objetivo del experimento es el de investigar como depende el período de oscilación "T" del péndulo (oscilando en el plano perpendicular) en función de la longitud " $\lambda$ " de los hilos y la separación "s" entre estos.

El equipamiento con que el que usted cuenta es el siguiente: dos hilos largos, cinta adhesiva, una regla graduada en milímetros, una barra que servirá como péndulo, papel logarítmico y un cronómetro.

**E3**

*Sugerencia*  
p.27  
*Solución*  
p.45

Determinación del valor de la aceleración de la gravedad.

*Clave: Ley de Hooke*

El objetivo de este experimento es determinar el valor de la aceleración de la gravedad usando un resorte en espiral. El resorte debe ser muy ligero.

El equipamiento con el que usted cuenta es el siguiente: un resorte en espiral hecho de alambre ligero, una regla milimétrica, cinta adhesiva, un soporte para colgar el resorte (puede ser una armella), un soporte para colocar pesas en el resorte, un conjunto de pesas iguales (pueden ser monedas, rondanas o tornillos) y un cronómetro.

¿Cómo juzgar si la masa del resorte es o no despreciable en el experimento?

**E4**

*Sugerencia*  
p.28  
*Solución*  
p.48

Determinación indirecta del área de una figura plana.

*Clave: ingenio*

El objetivo del experimento es determinar de manera aproximada el área de un círculo dibujado en una hoja de papel tamaño carta (8 x 11 pulgadas)

El equipamiento con el que usted cuenta es el siguiente: Una hoja de papel sobre la cual se ha dibujado previamente un círculo de tamaño arbitrario con un compás, otra hoja de papel tamaño carta, una hoja de papel carbón, cinta adhesiva y 10 canicas.

Después de estimar experimentalmente el tamaño del círculo deberá medir el diámetro del mismo con una regla, con el fin de calcular el área del círculo y compararla con el resultado de su experimento.

7  
ENUNCIADOS

Determinación indirecta del radio de curvatura de un espejo cóncavo esférico.

Clave: movimiento oscilatorio, momento de inercia, principios de conservación.

E5

Sugerencia  
p.26  
Solución  
p.50

Con ayuda de una esferita de acero (balín o rodamiento) de diámetro conocido y un cronómetro, se requiere evaluar la magnitud del radio de curvatura de un espejo cóncavo esférico (o el radio de curvatura de una lente cóncava).

Para el experimento, usted dispone de un espejo cóncavo como los que se usan para ayudar a rasurarse la barba, un pequeño balín de diámetro conocido y un cronómetro.

Determinación del volumen de una habitación.

Clave: péndulo simple

E6

Sugerencia  
p.26  
Solución  
p.53

Encuentre un procedimiento para determinar el volumen de una habitación.

Dispone de un hilo delgado bastante largo, cronómetro y una masa de peso conocido.

El movimiento de un lago.

Clave: péndulo simple, centro de masas.

E7

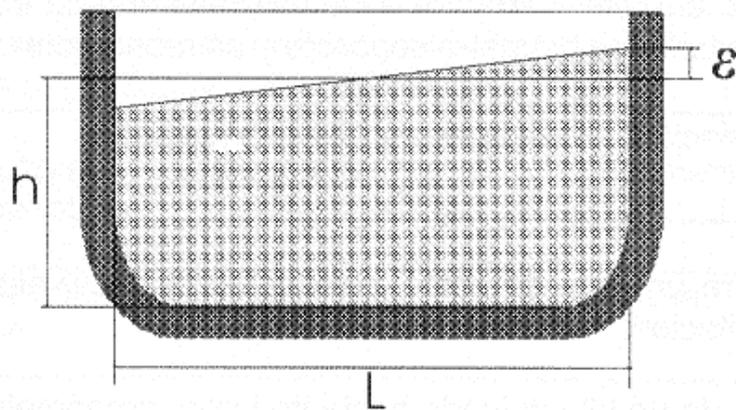
Sugerencia  
p.26  
Solución  
p.55

En algunos lagos largos y estrechos con aguas poco profundas, se observa de cuando en cuando un fenómeno curioso consistente en la oscilación de toda la masa de agua del lago. Se trata de una oscilación diferente a los modos normales de oscilación que se presentan en forma de olas sobre la superficie del lago. Más bien, el fenómeno se asemeja a la oscilación que observamos al transportar una taza de café.

Para estudiar experimentalmente el fenómeno fabricaremos el modelo de un lago. Para este propósito utilizaremos un recipiente de sección rectangular de longitud  $L$  que llenaremos de agua hasta un nivel  $h$ . El recipiente lo

colocaremos sobre una superficie horizontal. Para provocar oscilaciones en este "laguito", el recipiente debe alzarse levemente por el extremo más largo e inmediatamente colocarse suavemente sobre la superficie horizontal. De esta manera el agua oscilará de modo que su superficie permanecerá aproximadamente plana. La oscilación inicial se muestra de manera esquemática en la figura 3.

Figura 3  
Se muestra la superficie del agua desviada respecto al estado de equilibrio. La superficie de la misma se mantiene siempre plana



Nota: Para mayor claridad, la magnitud de la desviación  $\varepsilon$  definida en la figura 3 se ha exagerado. Esta magnitud es mucho menor que la profundidad  $h$  del agua.

El objetivo del experimento es comparar los valores experimentales del período de oscilación del agua para diversas profundidades de la misma, contra un modelo teórico.

1. Elabore un modelo teórico para el movimiento del agua, en particular obtenga una expresión para el período de oscilación  $T$  en función de la longitud del lago  $L$  y de la profundidad del agua.
2. Para dos recipientes de longitud distinta  $L$ , mida experimentalmente los períodos de oscilación  $T$  para distintas profundidades  $h$ .

3. Compare los resultados obtenidos en el apartado 2 contra los valores calculados a partir del modelo elaborado en el apartado 1. En caso de existir discrepancias entre los valores teóricos y experimentales, determine el valor apropiado de corrección.

El equipamiento necesario para el experimento consiste de: una regla graduada en mm, dos recipientes de 50 y 15 cm de largo y un cronómetro.

Medición de la densidad de un líquido.

Clave: presión hidrostática.

E8

Sugerencia  
p.28  
Solución  
p.58

Encuentre la densidad de un líquido. Recuerde que la densidad del agua es igual a la unidad.

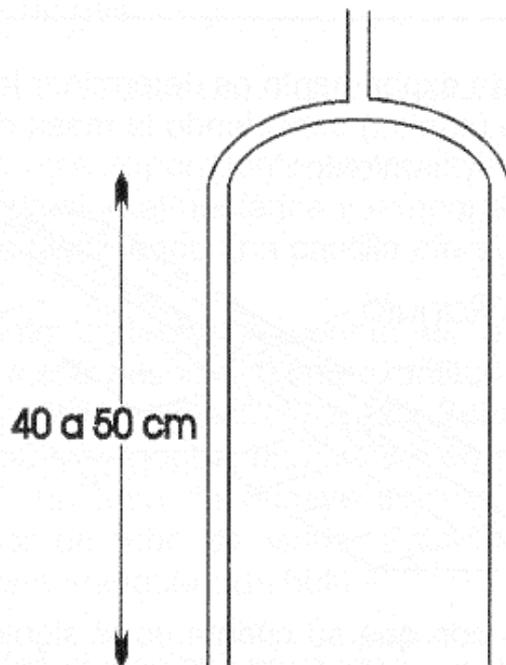


Figura 4  
Tubo con  
dimensio-  
nes  
aproxi-  
madas

El equipamiento necesario para el experimento consiste de: dos vasos, uno con agua y otro con el líquido desconocido, un tubo de vidrio de 1/2 cm de diámetro interno en forma de

U como muestra la figura 4., un tubo corto de hule, de los usados en conexiones de gas butano para los mecheros Bunsen, y una pinza de presión para tubo de hule, esto con el propósito de cerrar el tubo por su parte media. La figura 4 muestra el tubo en detalle con sus dimensiones.

Al hacer sus mediciones es posible que usted note el efecto de la tensión superficial. Este se manifiesta particularmente si se utiliza tubos delgados y se conoce como el fenómeno de capilaridad. El efecto causa que el liquido tienda a subir por el interior del tubo más que lo que se esperaría únicamente por el efecto de diferencias de presión. La tensión superficial produce una elevación fija y constante de los niveles de los líquidos dentro del tubo. Este experimento elimina este error sistemático ¿Cómo?

**E9**

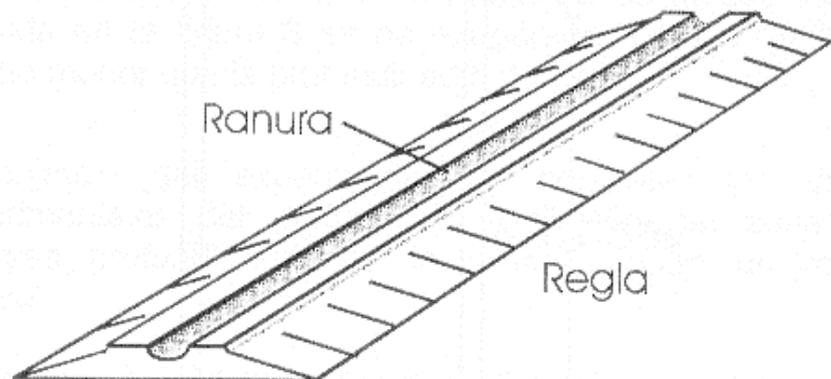
*Sugerencia*  
p.28  
*Solución*  
p.60

La masa de una esferita.

*Clave: conservación de momento, conservación de energía, tiro parabólico.*

El objetivo de este experimento es determinar la masa de una esferita de vidrio (canica) conociendo la masa de otra esferita de acero (balín o rodamiento).

Figura 5  
Regla  
de  
aluminio  
con  
ranura



El equipamiento con que se cuenta es el siguiente: Mesa de trabajo, dos esferitas, una de masa conocida y la otra por determinar. Un transportador para medir ángulos, un hilo delgado con plomada, una regla de plástico, hojas de papel blanco y papel copia (papel carbón) y una regla de aluminio con una ranura como la que se muestra en la figura 5.

11  
ENUNCIADOS

---

Medición de la densidad de una barrita de madera.

Clave: momento de una fuerza (torque), fuerza de Arquímedes.

---

E10

Sugerencia  
p.28  
Solución  
p.64

Se tiene un objeto largo y delgado como una barra o varilla de madera y se quiere determinar la densidad de la misma. La manera directa de hacerlo es pesando el objeto para obtener el valor de la masa y midiendo sus dimensiones físicas para obtener su volumen. El cociente entre la masa y el volumen del objeto nos daría la densidad buscada. Sin embargo, suponga que no cuenta con una balanza para determinar pesos. La barra es delgada, larga y flota en el agua.

¿Cómo podría medir la densidad del objeto, si sólo cuenta con un recipiente en el cual puede sumergir el objeto en agua y una regla graduada?

---

El volumen de un gas

Clave: gas ideal

---

E11

Sugerencia  
p.29  
Solución  
p.67

El objetivo de este experimento es medir la densidad de un gas  $\text{CO}_2$  a presión atmosférica y temperatura ambiente. El gas se obtiene disolviendo una pastilla efervescente.

El equipamiento con el que cuenta es el siguiente: Una balanza para medir pesos con una exactitud de al menos 0.1 gramos, una pastilla efervescente (Alka-Seltzer), una probeta graduada de  $500 \text{ cm}^3$ , agua, una cubeta de al menos 20 litros de capacidad, un tubo de ensayo con un tapón perforado atravesado por un tubo de vidrio. Este tubo deberá estar conectado a una manguera de hule.

---

Latas con perforaciones en sus fondos.

Clave: presión hidrostática

---

E12

Sugerencia  
p.29  
Solución  
p.69

Considere varias latas fabricadas en hojalata como las que se usan en el envasado de conservas. Cada una de las latas

tiene un pequeño orificio circular de diámetro conocido en su fondo. Los diámetros de cada uno son distintos entre sí.

Cuando las latas se llenan con un determinado volumen de agua estas tardan en vaciarse un tiempo que depende de el diámetro del orificio.

El objetivo de este experimento es averiguar que relación existe entre el tiempo de salida de un mismo volumen determinado de agua y el área del orificio.

El equipamiento con el que cuenta es el siguiente: dos frascos de plástico o vidrio transparentes, papel milimétrico, tijeras, cronómetro y cuatro latas con orificios perforados con brocas de 1/32", 1/16", 1/8" y 1/4".

**E13**

*Sugerencia*  
p.29  
*Solución*  
p.72

---

Comparación de la intensidad de la luz entre dos focos incandescentes.

*Clave: intensidad luminosa*

---

La manera en que antiguamente se medía la intensidad luminosa de una fuente era comparando su intensidad con la de una vela la cual constituía un patrón de referencia. De hecho, la unidad de intensidad luminosa era y sigue siendo la "candela".

En la actualidad la intensidad luminosa de una fuente se mide normalmente, utilizando algún dispositivo electrónico. Sin embargo, todavía podemos utilizar el viejo método de comparación para realizar una interesante experiencia.

Existen muchos experimentos en los cuales estamos más interesados en comparar diferencias de intensidades que medir sus valores absolutos. Ese es el caso de los muchos espectrómetros que utilizan el método de doble haz.

El objetivo del experimento es comparar la intensidad luminosa de dos fuentes de luz incandescente.

El equipamiento con el que se cuenta es el siguiente: dos focos de distinta marca o bien de distinta potencia (p.ejem. 25W y 40W ), una regla de un metro de madera, una hoja de papel filtro a la que previamente se le ha dejado caer una gotita de aceite en su centro (por lo que se forma una manchita), dos espejos planos de tamaño pequeño, soportes para los espejos y el papel filtro, de manera que éstos puedan mantenerse en posición vertical.

Una idea de un posible arreglo experimental se muestra en la figura 6.

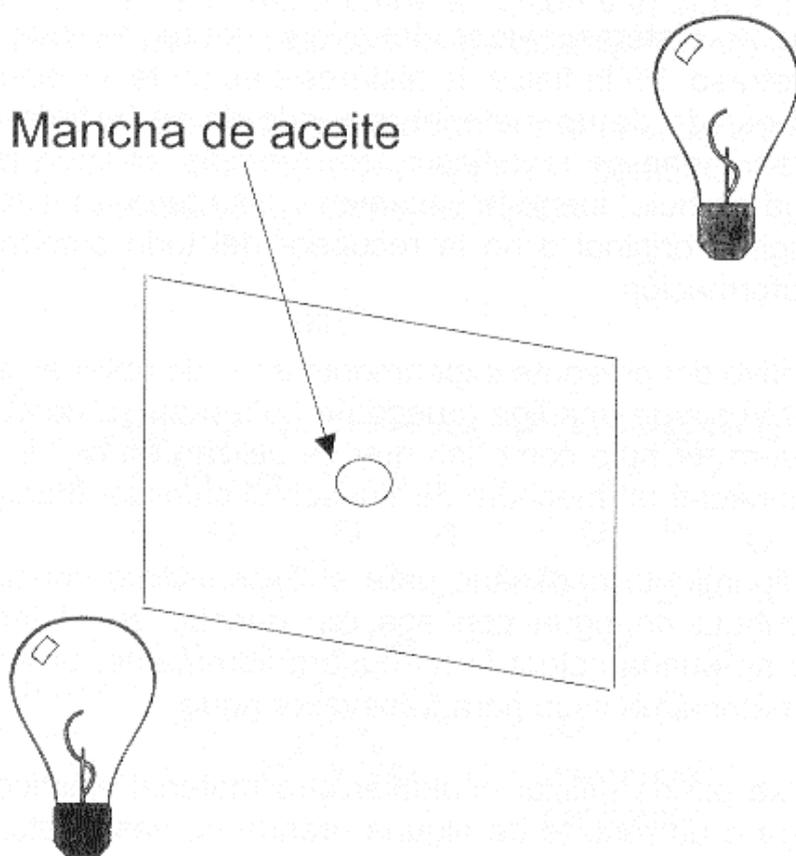


Figura 6  
Posible  
arreglo  
experi-  
mental

**E14**

*Sugerencia*  
p.29  
*Solución*  
p.75

Medición de la intensidad de la luz transmitida por una placa de vidrio

*Clave: naturaleza de la luz*

Cuando la luz pasa a través de un vidrio, su intensidad disminuye.

El objetivo de este experimento es conocer la fracción de la intensidad de luz transmitida por una placa de vidrio.

El equipamiento necesario para el experimento consiste de: seis placas de vidrio comercial de 3mm o 6mm y los implementos enlistados en el problema E13.

**E15**

*Sugerencia*  
p.29  
*Solución*  
p.78

Medición de la curva de histéresis de un material

*Clave: histéresis, trabajo y energía.*

La palabra histéresis viene del griego  $\upsilon\sigma\tau\acute{\epsilon}\rho\eta\sigma\iota\zeta$ , que quiere decir retraso. En la física, la histéresis es un fenómeno por el que el estado de un material depende de su historia previa. Este fenómeno se manifiesta, por ejemplo, cuando jalamos una liga de hule, luego la soltamos y esta tarda en recuperar su longitud original o no la recupera del todo sufriendo así una deformación.

El objetivo del presente experimento es el de obtener la curva de histéresis de una liga gruesa de hule o en su defecto una manguera de hule como las que se utilizan en el laboratorio para conectar un mechero de Bunsen al suministro de gas.

El equipamiento necesario para el experimento consiste de: Una cubeta de agua con asa, un gancho en el techo de donde se pueda colgar la manguera libremente, una regla o cinta métrica, un vaso para transvasar agua.

Nota: se puede utilizar cualquier otro material elástico como una liga o un resorte de alguna prenda de vestir, etc. Como peso aplicado se puede utilizar una lata para colocar clips de papel o bien tornillos.

Si al terminar un ciclo de histéresis, el material no regresa a su estado original quedando "estirado" ¿Puede Ud. determinar que cantidad de energía se empleó para lograr esta deformación?

Medición de la tensión superficial del agua

Clave: *histéresis, trabajo y energía.*

E16

Sugerencia  
p.29  
Solución  
p.80

Los líquidos tienen dos propiedades interesantes conocidas como cohesión y adhesión. Ambas propiedades son manifestaciones de la atracción molecular que ejercen las moléculas entre si. La figura 7 muestra esquemáticamente la frontera entre las moléculas de un líquido y el aire. Las flechas indican las fuerzas de atracción entre las moléculas del líquido. Las fuerzas mostradas son las responsables por la cohesión en la frontera entre el líquido y el aire así como de la adhesión del primero con las paredes que lo contienen.

Además de las fuerzas de atracción sobre la capa superficial actúan también otras fuerzas que no permiten a estas moléculas trasladarse al interior del líquido.

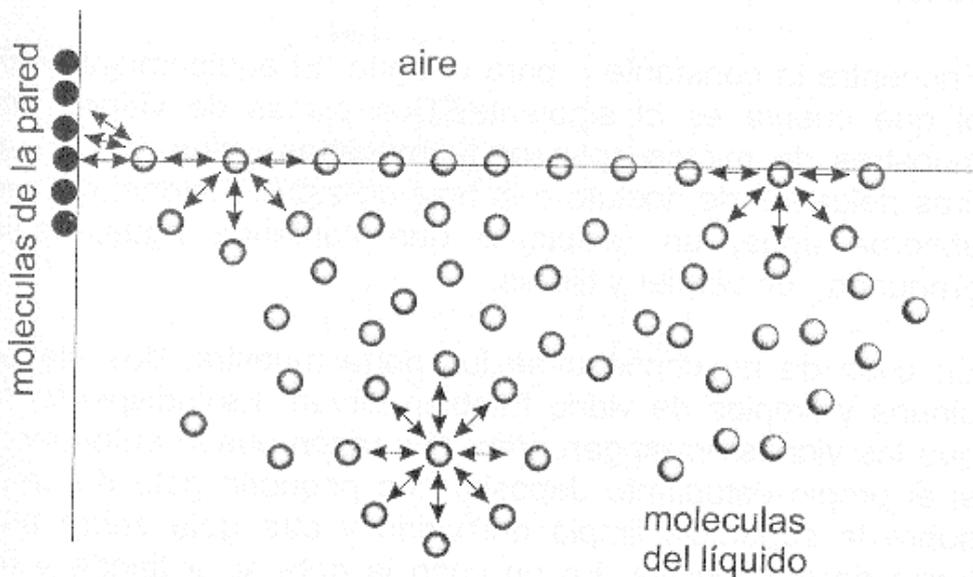


Figura 7  
Moléculas de un líquido

La cohesión es la fuerza que permite a un líquido resistir esfuerzos tensiles y es responsable de la tensión superficial del líquido. La adhesión permite al líquido adherirse a la superficie de otro cuerpo. Cuando la cohesión es dominada por la adhesión, el líquido subirá por las paredes del contenedor hasta un punto llamado de contacto. Este fenómeno se conoce como capilaridad.

La capilaridad se debe tanto a la cohesión como a la adhesión. Es posible observarla en tubos transparentes cuyo diámetro interno sea pequeño. Al sumergir un extremo de dichos tubos en agua, podemos observar como ésta "sube" hasta alcanzar un nivel que depende del diámetro interno del tubo.

Este fenómeno puede ser descrito suponiendo que la pared ejerce una fuerza  $F$  de atracción sobre el líquido, que es proporcional a la longitud  $l$  de la línea de contacto entre la pared y el líquido. En otros términos,

$$F = \sigma l$$

donde  $\sigma$  es una constante y  $F$  esta dirigida verticalmente.

Encuentre la constante  $\sigma$  para el agua. El equipamiento con el que cuenta es el siguiente: Dos placas de vidrio para muestras de microscopia (porta muestras), cinta adhesiva, tiras delgadas de acetato o la hoja de algún material que no absorba agua, un recipiente que contenga agua, regla graduada, un vernier y tijeras.

En caso de no conseguirse los porta muestra, dos placas planas y limpias de vidrio también sirven. Es indispensable que los vidrios no tengan grasa. La razón puede entenderse si el propio estudiante deposita una pequeña gota de agua sobre la superficie limpia del vidrio y otra gota sobre una barra de mantequilla. En un caso la gota se extiende y en otro no.

El período de oscilación de una columna de agua.  
El movimiento oscilatorio amortiguado.

**E17**  
Sugerencia  
p.30  
Solución  
p.83

El problema consiste en determinar que relación existe entre el período de oscilación  $T$  y la longitud de una columna  $L$  de agua en el interior de un tubo transparente de plástico.

Además deberá de construir un modelo teórico del fenómeno.

La figura 8 muestra un esquema simplificado del dispositivo experimental, consistente de un pedazo de tubo transparente y flexible (plástico transparente y flexible) de unos 2 m de longitud. El tubo deberá estar lleno de una columna de agua de longitud  $L$ . Se requiere además de un cronómetro.

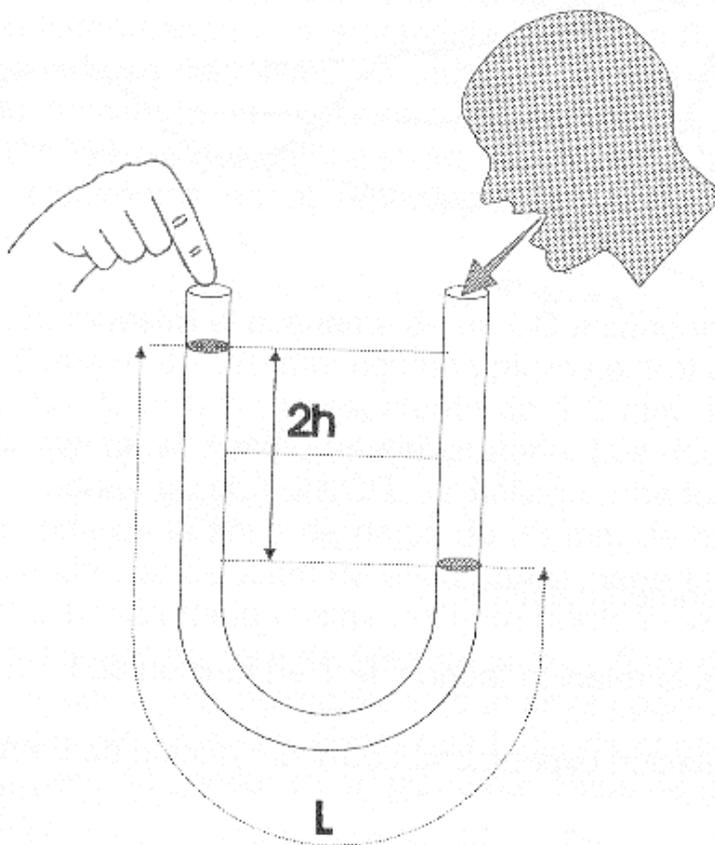


Figura 8  
Arreglo  
experimental

Para producir las oscilaciones se puede soplar por un extremo del tubo y elevar la altura de la columna de agua una distancia  $2h$  sobre el nivel más bajo. El otro extremo del tubo puede ser obturado temporalmente con un dedo y al retirarse permite que ocurran las oscilaciones.

Al hacer el experimento usted notará que la columna oscila amortiguadamente con un coeficiente de amortiguamiento  $\gamma$  como lo muestra la figura, donde  $A = 2h$ .

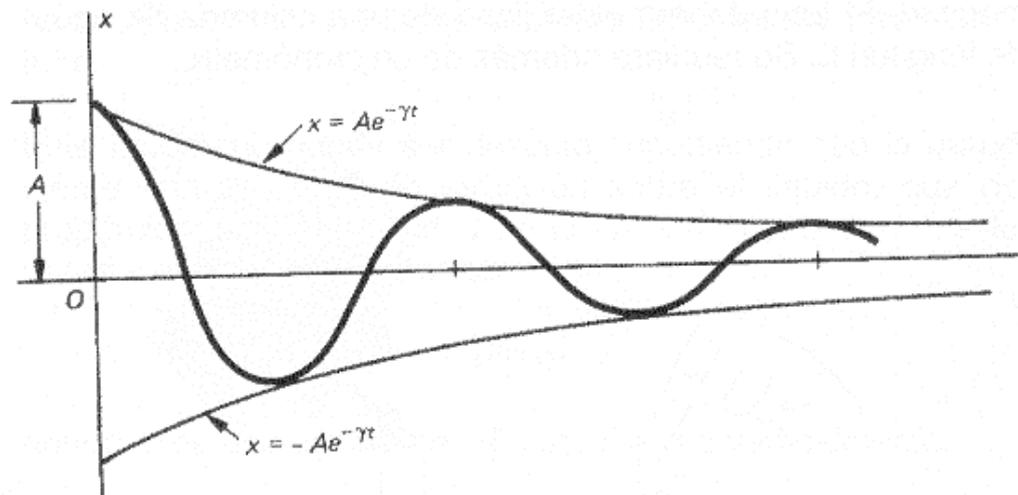


Figura 9  
Amorti -  
guamiento  
Amplitud  
vs. tiempo.

Del experimento estime  $\gamma$ .

¿Cuál es la relación teórica de T en función de L ?

¿Qué relación experimental de T en función de L encontró ?

Difracción con un disco compacto. (CD o CD-ROM).  
Clave difracción de la luz.

**E18**

Sugerencia  
p.30  
Solución  
p.87

El problema consiste en determinar la longitud del surco en espiral de un disco compacto.

Los discos compactos, conocidos también como CDs por sus siglas en inglés (Compact Discs), sirven para almacenar una gran cantidad de información en su superficie. La información que guardan puede consistir en programas de cómputo, datos, o música la cual es "digitalizada" mediante una serie de pequeñas cavidades a lo largo de un surco en espiral sobre una de las caras del CD.

El surco corre en una espiral continua desde una circunferencia interior a otra exterior. El surco es muy delgado y las cavidades tienen una profundidad de unos 0.12  $\mu\text{m}$  por debajo de la base del mismo. La información contenida en la espiral es descifrada en un lector o reproductor de CDs, con un láser de 780 nm que enfoca su luz en el surco. Un sistema óptico y electrónico en el reproductor de CDs recoge la información.

La figura 10 muestra el esquema de un CD estándar. El disco tiene un diámetro de 120 mm con un orificio central de 15 mm y un ancho de la base transparente de 1.2 mm. El orificio sirve para sujetar al disco a un eje giratorio. Los documentos (música, programas, etc) del CD, se hallan grabados en una espiral situada en la zona de datos de 33 mm de extensión. Una banda circular de 2 mm de ancho en la parte interna del disco y otra banda de la misma anchura bordean la zona de datos y reciben el nombre de área de inicio y área de salida. Estas áreas contienen instrucciones que sirven para controlar al reproductor de CDs, por ejemplo la tabla de contenido del disco, etc, pero no contienen propiamente datos de programa o de audio.

El objetivo del problema es calcular cuál es la longitud de la espiral en la zona de datos, utilizando una cinta métrica

metálica de una longitud de 2m, un apuntador láser cuya longitud de onda según el fabricante es de 780 nm (¡ojo nanómetros !) una pared o pantalla amplia y el propio CD. Se puede utilizar cinta adhesiva para fijar la geometría del apuntador láser , del CD y en su caso de la pantalla.

Suponiendo que en un disco compacto de audio dura una hora la grabación ¿a que velocidad en rpm (revoluciones por minuto) gira el CD? Es interesante recordar que los antiguos discos de acetato giraban a 33, 45 y 78 rpm.

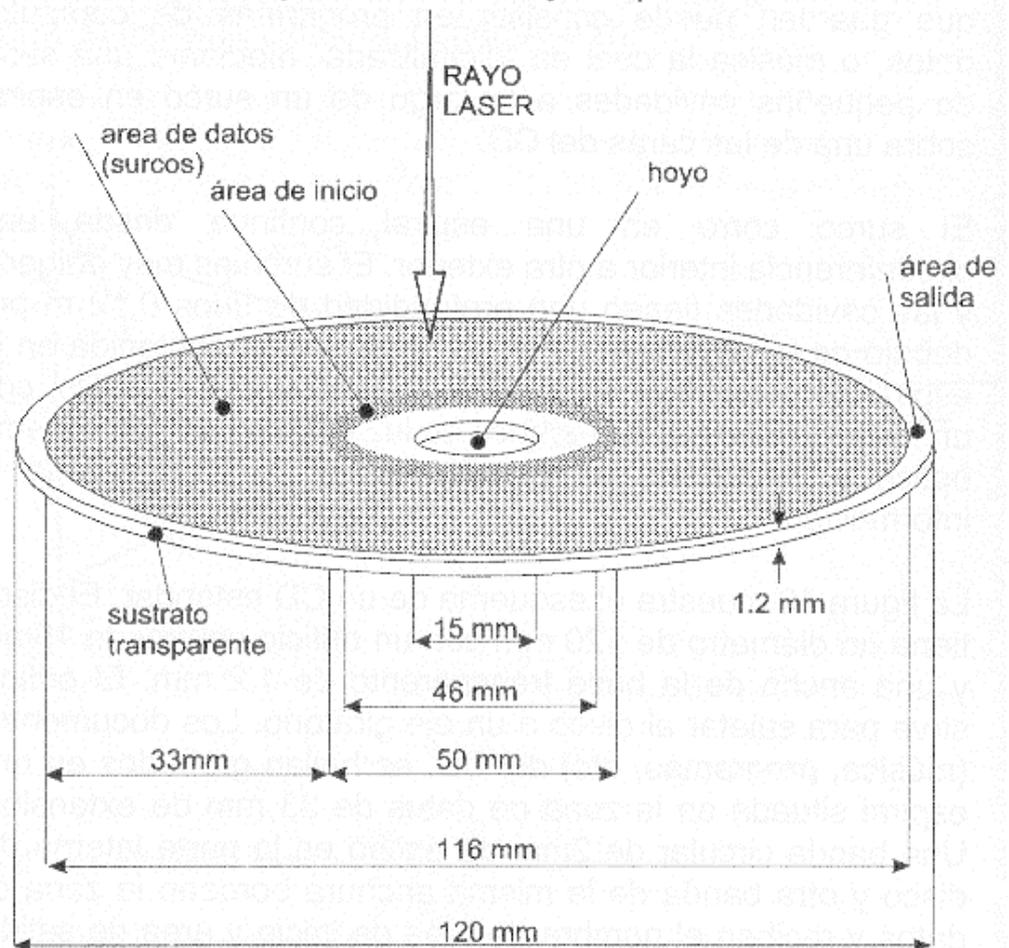


Figura 10.  
Esquema  
de un CD

**ADVERTENCIA DE EXTREMA IMPORTANCIA.**

Nunca mire directamente al rayo laser, ni lo dirija a los ojos de ninguna otra persona. Puede ocasionar ceguera permanente.

Simulación de la dispersión de la luz por contaminación atmosférica.

Clave dispersión de la luz.

**E19**

Sugerencia  
p.30  
Solución  
p.91

“Viajero, has llegado a la región más transparente del aire”

El gran escritor mexicano Alfonso Reyes escribió en la primera mitad del siglo XX la frase anterior en alusión a la situación atmosférica del valle de México. Hoy notaría una diferencia en la transparencia del aire que flota en dicho valle.

Cuando el polvo, humo, polen o diminutas gotitas de agua flotan en el aire, el cielo se torna difuso. A los fotógrafos de exteriores les conviene esta situación ya que las sombras se vuelven menos marcadas. Algunas plantas de sombra mejoran su crecimiento ya que reciben luz que no recibirían de otra manera. Sin embargo esta situación tiene su contraparte ya que la visibilidad decrece pero peor aún, respiramos todas esas partículas suspendidas en el aire.

En este experimento simularemos una atmósfera contaminada. El objetivo es determinar la relación entre el ángulo de dispersión de la luz proveniente de un apuntador láser ( $\lambda=680$  nm) y la concentración de pequeñas gotitas de grasa mezcladas en agua.

La leche entera de vaca contiene pequeñas gotitas de grasa mas o menos del tamaño de las partículas grandes que contaminan la atmósfera ( $1\mu\text{m}$  a  $100\mu\text{m}$ ). Debido a su tamaño las podemos utilizar para simular partículas grandes suspendidas en la atmósfera. Pero primero es conveniente aclarar lo que entendemos por partículas grandes. Estas son las de tamaño mayor que la longitud de onda de la luz que dispersan. La luz visible tiene longitudes de onda entre 380 a 760 nm y por lo tanto las gotitas de grasa resultan grandes en comparación con la luz.

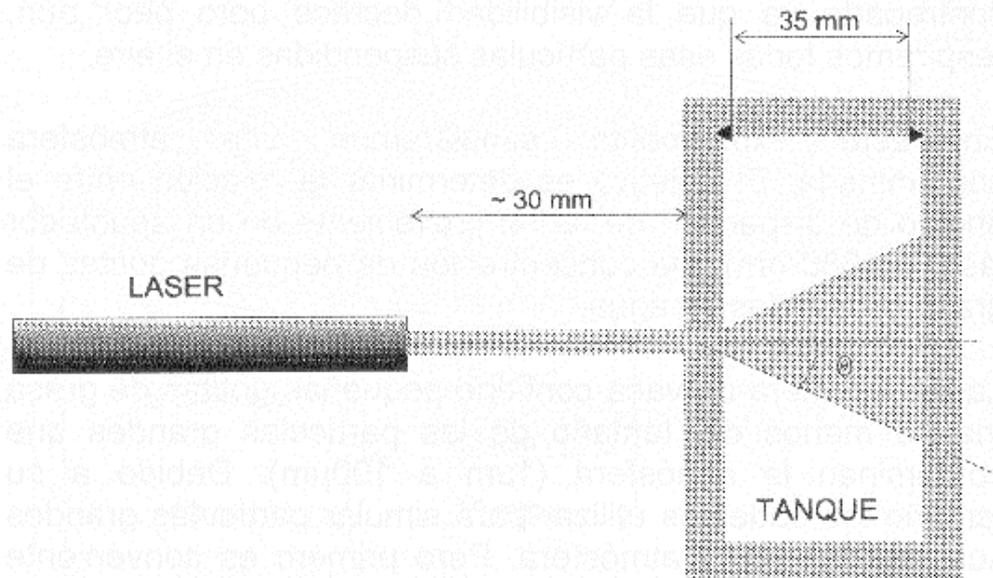
Para simular el aire limpio utilizaremos un pequeño tanque de vidrio en forma de pecera de base rectangular. Este tanque puede ser fabricado fácilmente en cualquier vidriería. Las dimensiones tienen que ser tales que al menos dos de sus

paredes se encuentren a unos dos o tres centímetros de separación. También puede ser utilizado un contenedor de plástico acrílico transparente de sección rectangular como los empleados por algunos fabricantes de golosinas para expender sus productos.

El tanque se llena con un volumen conocido de agua y mediante un gotero se varía el porcentaje en volumen de la leche con respecto al volumen total del agua del tanque.

El propósito del experimento es medir el ángulo  $\theta$  de dispersión de la luz en función del porcentaje en volumen de la concentración de leche. El ángulo  $\theta$  esta definido en la figura 11 en donde se muestra una posible geometría del arreglo experimental

Figura 11  
Arreglo experimental



El equipo que usted dispone consiste de un tanque, un gotero, una jeringa de más de 10 ml, una regla graduada en 0.5 mm, un cartón o papel blanco (opcional) y un apuntador láser.

**ADVERTENCIA DE EXTREMA IMPORTANCIA.**

Nunca mire directamente al rayo láser, ni lo dirija a los ojos de ninguna otra persona. Puede ocasionar ceguera permanente.

Un cerillo que se dobla.

Clave coeficiente de expansión térmica

E20

Sugerencia  
p.30  
Solución  
p.93

Los cerillos o fósforos de madera cambian de forma después de quemarse. Si encendemos un cerillo y lo mantenemos en posición horizontal, la flama se va moviendo a lo largo del palito de madera. Inmediatamente detrás de la flama se presenta una región al rojo vivo que sigue a la llama. Este es el lugar de máxima temperatura (700-750 °C) donde el quemado del palito ha terminado. La región se va enfriando y la parte quemada de color negro se dobla hacia arriba. Ver figura 12.

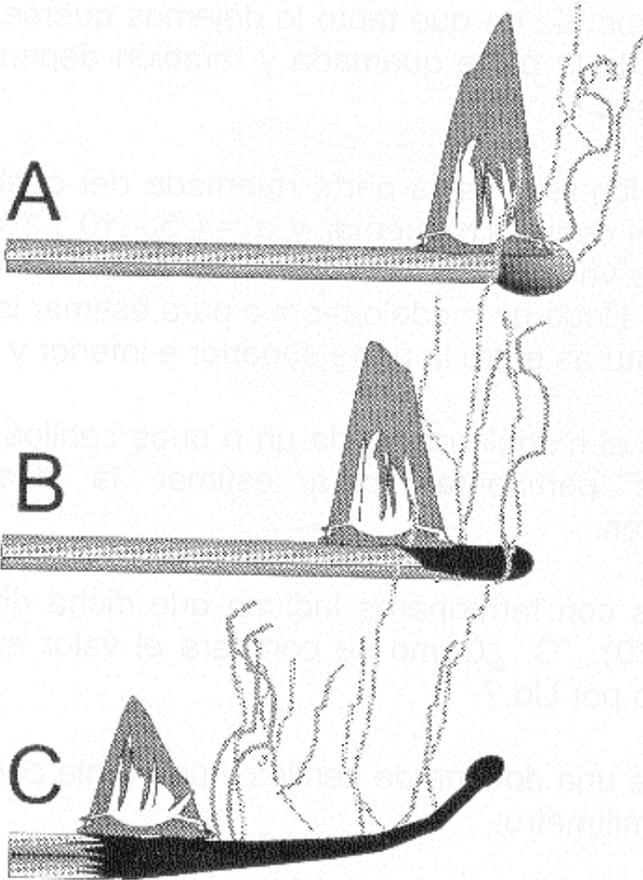


Figura  
12

Si observamos minuciosamente la región al rojo vivo, esta permanece horizontal y solo cuando se enfría poniéndose negra se comienza a doblar. La parte más caliente de la región al rojo vivo es aquella más pegada a la flama, en otras

palabras la parte superior del palito. A pesar de que existe una diferencia de temperaturas  $\Delta T$  entre la temperatura de la parte superior  $T_s$  y la inferior  $T_i$  la región permanece recta sin doblarse. Es cuando la región se enfría que el palito se dobla. Al enfriarse el cerillo la parte superior como la parte inferior se equilibran térmicamente llegando a la misma temperatura, sin embargo la parte superior se enfría desde una temperatura más alta que la inferior y por lo tanto se contrae más que su contraparte inferior, ocasionando que el cerillo se curve con concavidad hacia arriba.

También podemos observar que la curva en la que se dobla el cerillo depende de que tanto lo dejemos quemar, es decir, la longitud de la parte quemada y también depende de que tan ancho sea el cerillo.

Si  $L$  es la longitud de la parte quemada del cerillo,  $h$  es la anchura del cerillo sin quemar y  $\alpha = (5 - 10) \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  es el intervalo de valores para el coeficiente de expansión térmica del carbón. Haga un modelo teórico para estimar la diferencia de temperaturas entre la parte superior e inferior y del cerillo.

Basado en el modelo encienda un o unos cerillos y haga las mediciones pertinentes para estimar la diferencia de temperaturas.

Mediciones con termopares indican que dicha diferencia es de  $(80 \pm 20) \text{ }^\circ\text{C}$ . ¿Cómo se compara el valor experimental encontrado por Ud.?

Dispone de una docena de cerillos y una regla con divisiones de medio milímetro.

Es importante que no sople el cerillo, ni que este se encuentre en corrientes de aire. La razón es simple, la causa de la diferencia de temperaturas entre la parte superior e inferior del cerillo son las corrientes convectivas en el aire que rodea al cerillo. Si sopla por encima del cerillo levemente sin apagarlo verá que el área quemada no se dobla.

## Parte 2

## Sugerencias

---

Sugerencias

---

El experimento debe realizarse con mucho cuidado. Es importante asegurar que la burbuja ha alcanzado su velocidad terminal. Para esto hay que medir el tiempo de tránsito de la burbuja entre las dos marcas en el tubo. La primera marca deberá estar colocada a unos cuantos centímetros del extremo inferior. Otro punto importante es cuidar que el volumen de la burbuja sea el mismo en cada caso.

E1

---

Si variamos la separación "s" entre los hilos del péndulo bifilar manteniendo fija la longitud "d" de los hilos y después variamos "d" manteniendo fija "s", es fácil percatarse que el período de oscilación  $T$ , esta en función de estas dos cantidades. Por lo que podemos escribir,

E2

$$T = \text{cte } d^m s^n$$

o bien,

$$\log T = m \log d + n \log s + \text{cte}'$$

Note que si mantenemos  $s$  constante y variamos  $d$  la relación de arriba se convierte en la ecuación de una recta con pendiente  $m$ . Análogamente si variamos  $s$  y mantenemos constante  $d$  la pendiente de esta otra recta es  $n$ .

---

El contar con varias masas nos brinda la oportunidad de investigar que tan válida resulta la aproximación de considerar al resorte con una masa despreciable.

E3

Para esto debemos medir los períodos de oscilación  $T_i$  para cada una de las masas cuyos pesos  $W_i$  conocemos y encontrar la relación entre  $T$  y  $W$

**E4**

Este experimento requiere que su resultado lo dejemos al azar.

---

**E5**

Deje rodar la canica sobre la superficie del espejo. Tome en cuenta que la canica no es un punto.

---

**E6**

Use la cuerda como cinta métrica. ¿Cómo hacer las debidas graduaciones a la cinta?

---

**E7**

Para hacer el modelo teórico, piense donde se encuentra el centro de masa de todo el volumen de agua cuando este se encuentra en reposo. Ahora piense a donde se desplazaría el centro, si se eleva el recipiente ligeramente por uno de sus extremos. Suponga que al ocurrir esta elevación la superficie del agua permanece plana.

---

**E8**

Piense en el porqué un líquido se eleva más que el otro.

---

**E9**

No olvide el principio de conservación de la cantidad de movimiento.  
En el tiro parabólico hay una componente de velocidad que se conserva.  
No intente usar la regla como balanza para hallar la masa.  
Puede torcer la regla si lo considera conveniente.

---

**E10**

En principio podría medir el volumen de agua que desplaza la barrita al flotar y podría medir el volumen de la barrita. Pero, ¡¡¡ este método se presta a grandes errores !!! . ¿Qué pasa si recarga la barrita en la pared del recipiente y el otro extremo lo pone en el agua?

---

---

Mida el volumen del gas por desplazamiento de agua.

E11

---

Mida un cierto volumen fijo de agua que haya salido de la lata utilizando uno de los frascos transparentes. El volumen puede medirse entre dos marcas a distinta altura en la pared del frasco, sin necesidad de conocer la sección transversal del frasco, siempre y cuando la sección sea uniforme. Probablemente la parte inferior del frasco esté redondeada y la sección no será uniforme, por lo que la marca inferior deberá colocarse antes de donde empiece la curvatura del frasco.

E12

---

Coloque los focos de manera que haga "desaparecer" de su vista a la mancha de aceite.

E13

---

Cada vez que la luz pase por una placa de vidrio, su intensidad se vera disminuida por el mismo factor.

E14

---

En una gráfica de fuerza aplicada contra elongación, ¿qué representa el área bajo la curva?

E15

---

Haga subir el agua entre las dos placas de vidrio. Tenga en cuenta el valor del perímetro de la línea de contacto entre el agua y las paredes.

---

El experimento se realiza cortando tiras largas y delgadas de acetato y colocándolas a manera de cuñas entre ambos extremos largos de los vidrios porta muestras. Con pequeñas tiras de cinta adhesiva se fija el arreglo. Entre ambas placas de los porta muestras se forma así un volumen que puede ser variado agregando más tiras de acetato para variar la separación s entre las placas.

E16

**E17**

Para hacer el modelo teórico considere que lo que "empuja" a toda la columna de agua es la masa de agua cuya altura es al principio igual a  $2h$ . Este empujón va variando conforme se reduce la altura  $2x$ . Según la segunda ley de Newton esta fuerza de empuje tiene que ser igual a la masa total de la columna por su aceleración  $d^2x/dt^2$ . Va a llegar a una ecuación muy familiar. ¿Qué le recuerda?. Calcule de esa ecuación el período de oscilación  $T$ . ¿Cómo tiene que variar teóricamente  $T$  con  $L$ ?

---

**E18**

Para poder estimar la separación entre los surcos del disco debemos utilizar la ecuación de difracción,

$$\pm m\lambda = d \sin \theta$$

---

**E19**

Para determinar la concentración de leche, primero se tiene que determinar el volumen de una gota suministrada por el gotero.

---

**E20**

Para hacer el modelo, la idea es dividir al cerillo en dos mitades una superior y otra inferior.

La diferencia de longitudes entre una mitad y la otra se puede expresar como,

$$I - S = L \alpha \Delta T$$

donde  $S$  es la longitud de la mitad superior  $I$  es la longitud de la mitad inferior,  $\alpha$  es el coeficiente de expansión térmica y  $\Delta T$  es la diferencia de temperaturas. Esta última cantidad es la que queremos encontrar.

Para hacer un modelo y encontrar  $\Delta T$  a partir de cantidades experimentalmente evaluables es conveniente pensar en la figura 13.

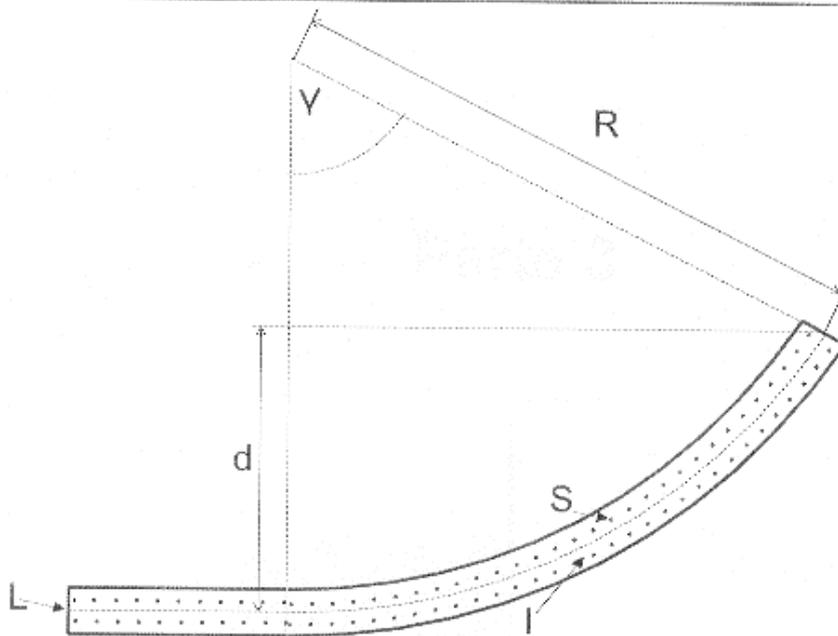


Figura  
13

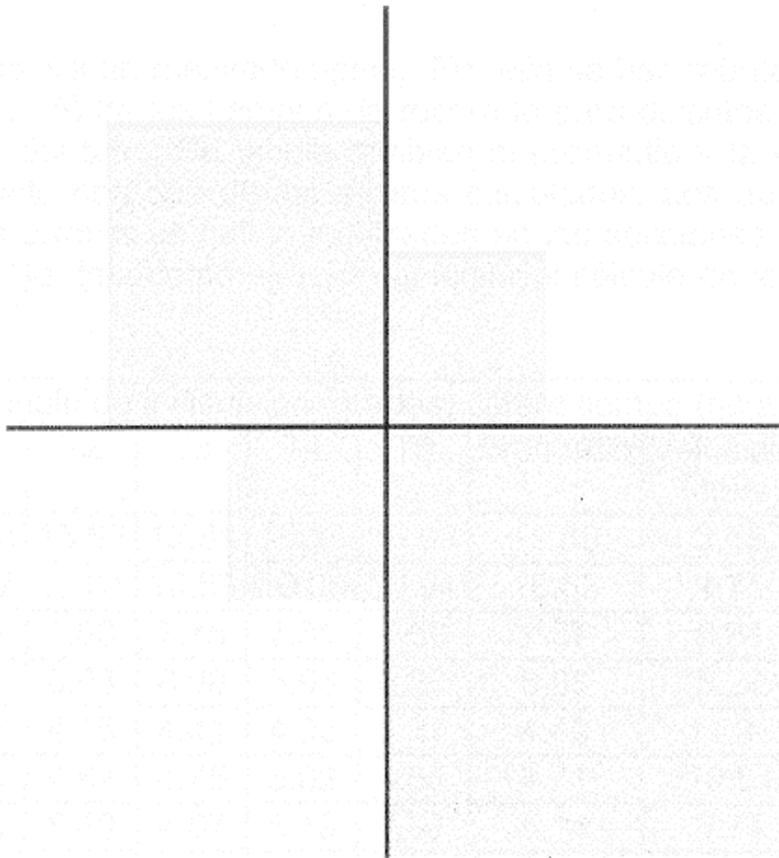
El parámetro  $d$  es fácil medir experimentalmente por lo que es recomendable expresar  $\Delta T$  en función de esta cantidad. La siguiente relación trigonométrica le puede ser útil,

$$1 - \cos \gamma = 2 \cos^2 W$$

donde  $W$  es el ángulo entre  $R$  y la cuerda del arco  $S$  (ver figura 13).

Finalmente es conveniente recordar que para ángulos pequeños el arco de una circunferencia puede ser aproximado por la cuerda.

## Parte 3



**Soluciones y  
Comentarios**

E1

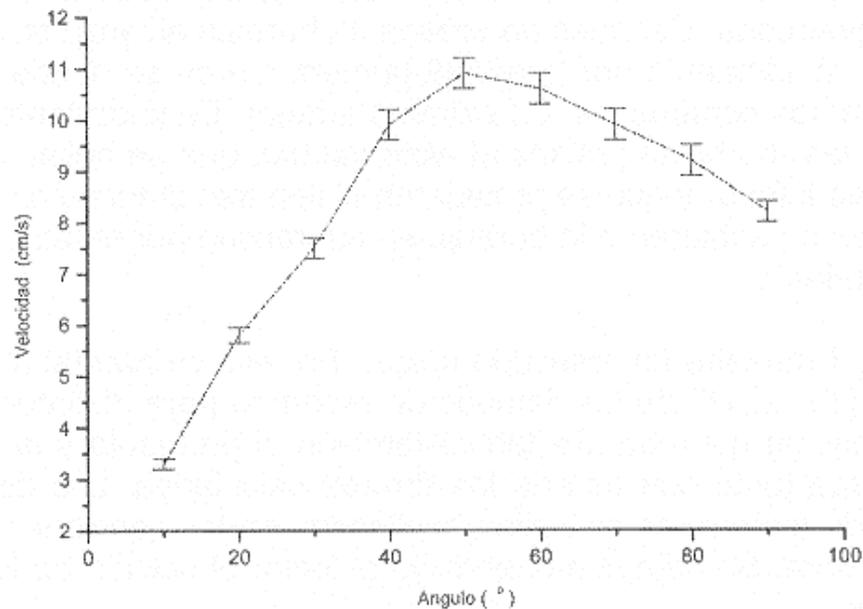
Sobre el tubo transparente de vidrio se marcaron 50 cm de recorrido. La burbuja se crea inyectando un volumen fijo de aire mediante la jeringa graduada. Después de creada, la burbuja alcanza su velocidad terminal rápidamente por lo que la primera marca se puede colocar a unos cuantos centímetros del extremo inferior. Es importante tratar de eliminar las burbujas previas al experimento, que se hallan adheridas a la pared interior y que se produjeron al llenarse el tubo con agua, ya que estas se adhieren a la burbuja en su tránsito por el tubo, limitando su movimiento.

La tabla 1 muestra un resultado típico. En ella se han tabulado cinco valores (T1, ..., T5) de los tiempos de recorrido para distintos ángulos de inclinación del tubo. Se tabula también el promedio y la velocidad encontrada junto con dos de los errores calculados. Los detalles del cálculo de los errores se hallan explicados en las secciones 4.3 y 4.4 de esta obra. Se deja como ejercicio al lector el cálculo de los errores restantes.

Tabla 1. Angulo de inclinación (grados) contra tiempo (segundos)								
Angulo ±2°	T1	T2	T3	T4	T5	Promedio	Velocidad (cm/s)	Error* ±
10°	16.78	15.63	15.81	15.16	16.09	15.89	3.15	0.13
20°	10.87	10.31	10.57	10.00	10.91	10.53	4.75	0.19
30°	7.66	7.63	7.75	7.31	7.50	7.57	6.61	
40°	6.01	6.03	6.08	5.95	6.32	6.08	8.22	
50°	4.13	4.15	4.41	4.95	4.37	4.40	11.36	
60°	4.43	4.84	4.75	5.02	4.51	4.71	10.61	
70°	5.25	5.40	4.87	5.19	4.97	5.14	9.74	
80°	5.45	5.88	5.49	5.30	5.02	5.43	9.21	
90°	5.95	6.02	6.09	6.21	6.19*	6.09	8.20	

\*Nota: para detalles sobre el cálculo del error ver secciones 4.3 y 4.4

La grafica siguiente muestra que la velocidad máxima es alcanzada en un ángulo comprendido entre 0° y 90°. Como se puede apreciar, en el caso mostrado en el ejemplo, esta velocidad máxima se halla alrededor de 50° de inclinación. Note que los errores están mostrados en la gráfica 1, como barras de error.



*Grafica 1 Velocidad terminal versus ángulo de inclinación para un experimento típico.*

La velocidad terminal de la burbuja depende del tamaño de la misma, el diámetro del tubo que la contiene y de una gran cantidad de otros factores.

El análisis teórico de este experimento resulta complicado y va más allá del nivel de este libro. Sin embargo podemos hacer algunos comentarios. La forma de la burbuja depende de su volumen así como de la sección transversal e inclinación del tubo (figura 14).

La presión dentro de la burbuja es constante y compensa la presión estática, hidrodinámica y la tensión superficial. Si el flujo fuera laminar, cosa que no lo es, estos agentes determinarían la forma de la burbuja.

El lector podría preguntarse ¿qué es un flujo laminar?.

Existen dos tipos básicos de flujo, cada uno de los cuales tiene características diferentes. El primer tipo se conoce como flujo laminar

donde el fluido (líquido o gas) se mueve como si estuviera compuesto de láminas. En este tipo de flujo, una partícula perteneciente a una lámina permanece siempre en la misma durante el movimiento de fluido.

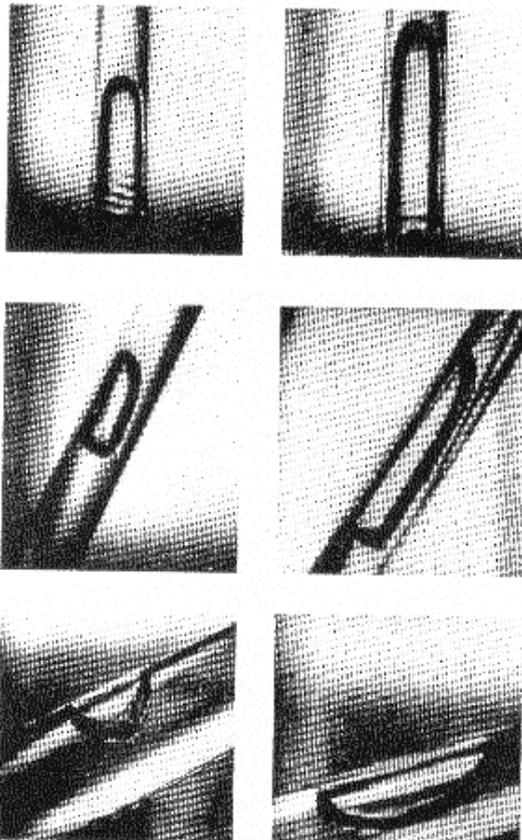
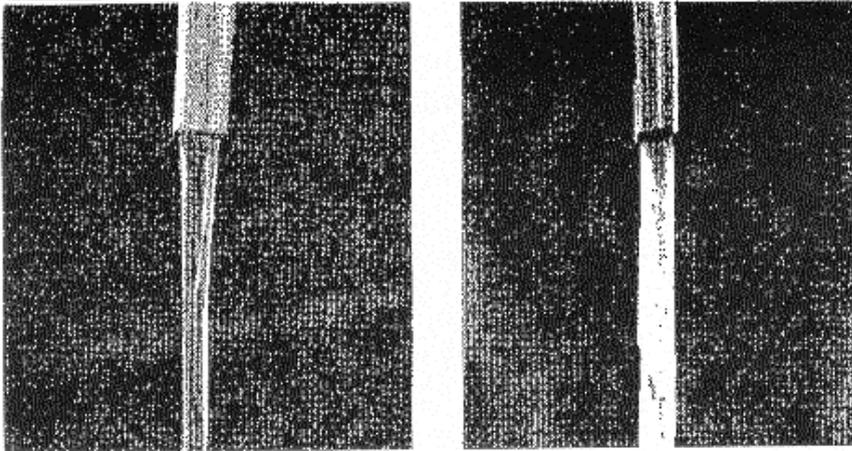


Figura 14.  
La forma de la burbuja depende de su volumen así como de la sección transversal e inclinación del tubo.

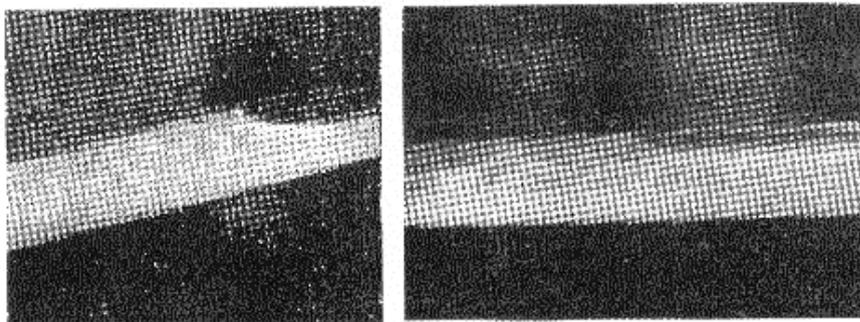
En el caso de un flujo turbulento las partículas se mueven de manera irregular y aleatoria (ver figura 15).

Para convencernos de que el flujo, en el caso del presente experimento, no es laminar sino turbulento (afectando así la velocidad terminal), podemos colorear el agua contenida dentro del tubo con alguna anilina de tono claro para no obscurecer demasiado el agua. La mejor es el tempera color plata pues contiene partículas de aluminio. La figura 16 muestra los vórtices (llamados de Kármán) formándose continuamente por detrás de la burbuja.



*Figura 15.*  
A la extrema  
izquierda. Flujo  
laminar.

A la izquierda.  
Flujo turbulento.



*Figura 16.*  
Vórtices  
formándose detrás  
de la burbuja.

Como conclusión podemos destacar el valor pedagógico de este experimento, ya que nos enseña los peligros de adivinar los resultados de un experimento. Puede darse el caso, por ejemplo, que un estudiante haga sus primeras mediciones con ángulos pequeños sin llegar a encontrar la velocidad máxima. En este caso, el estudiante, va a observar que los valores de la velocidad van creciendo monótonicamente y se le puede ocurrir el hacer una extrapolación en su gráfica llegando a la conclusión falsa de que la velocidad siempre crece con el ángulo de inclinación.

Cabe mencionar que extrapolar sin información previa conduce a graves errores. Es común encontrar que a diario, este grave error, lo cometen muchos de nuestros economistas y "planeadores".

El péndulo se debe hacer oscilar ligeramente en la dirección indicada en el enunciado del problema.

E2

Se puede observar experimentalmente que el período de oscilación  $T$  depende de la longitud  $\lambda$  de los hilos y de su separación,  $s$ .

Supongamos entonces que, la dependencia es de la forma

$$T = K s^m \lambda^n,$$

Donde  $K$  es una constante y  $m$  y  $n$  son potencias desconocidas que debemos determinar experimentalmente.

Para poder determinar las potencias  $m$  y  $n$ , es conveniente modificar la ecuación anterior. Entonces, si tomamos los logaritmos de ambos lados de la expresión para  $T$ ,

$$\log T = \log K + m \log s + n \log \lambda$$

obtenemos una relación mas útil. La utilidad de esta relación proviene del hecho de que en el experimento resulta claro que debemos variar alguno de los dos parámetros, ya sea  $s$  o ya sea  $\lambda$  mientras el otro deberá permanecer constante. Entonces:

1. Si mantenemos fija la longitud de  $\lambda$  y medimos  $T$  para diversos valores de  $s$ , una gráfica de  $\log T$  versus  $\log s$  nos daría una línea recta cuyo valor de la pendiente proporciona el valor buscado de  $m$ .
2. De manera análoga, si  $s$  se mantiene constante y medimos  $T$  para diferentes valores de  $\lambda$ , entonces una gráfica de  $\log T$  versus  $\log \lambda$  tiene una pendiente igual a  $n$ .

De esta manera se pueden determinar las potencias  $n$  y  $m$ .

### Ejemplo

A continuación presentaremos un ejemplo típico de este experimento.

Inicialmente la longitud  $\lambda$  de los hilos se mantuvo a un valor constante de 55.5 cm y se hicieron tres mediciones del período T para cada una de los valores de la separación s entre hilos. Los valores de las mediciones se muestran en la tabla 2.

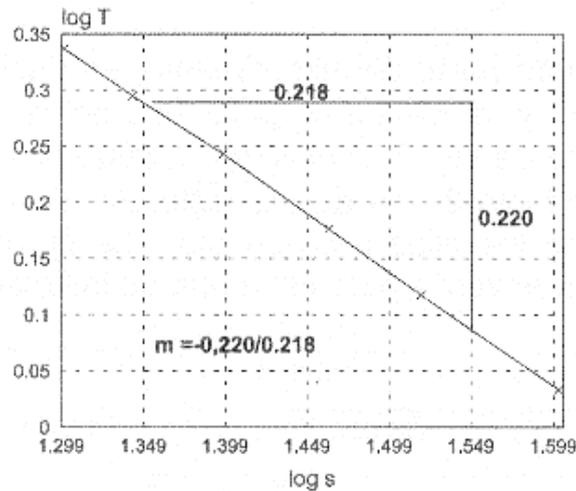
Tabla 2

s (cm)	No de oscilaciones	Tiempo (s)				Período T (s)	Log T	log s
		1	2	3	Promedio			
40.0	30	32.2	32.6	32.4	32.4	1.08	0.0334	1.6021
33.0	25	32.6	32.8	32.8	32.7	1.31	0.1173	1.5185
29.0	20	29.8	30.0	29.8	29.9	1.50	0.1761	1.4624
25.0	15	26.4	26.2	26.0	26.2	1.75	0.2430	1.3979
22.0	15	29.4	29.8	29.4	29.5	1.97	0.2945	1.3424
20.0	15	32.4	32.8	32.6	32.6	2.17	0.3365	1.3010

Como se puede apreciar en la segunda columna de la tabla 2, el número de oscilaciones varió entre 30 para la longitud mayor (40.0 cm) y 15 para la menor (20.0 cm). El número de oscilaciones que debemos considerar en un experimento donde intervengan péndulos debe ser el mayor posible sin que la amplitud de oscilación (que debe ser pequeña) disminuya apreciablemente.

Experimentalmente se puede observar que para péndulos largos, en comparación con los cortos, es mayor el número de oscilaciones que experimentan sin que se aprecie una disminución apreciable en su amplitud de oscilación. La explicación de este fenómeno es que a longitudes mayores de los hilos, las fuerzas de fricción tanto del aire como de los propios hilos influyen en menor grado que en el caso de péndulos con longitudes más cortas, y en consecuencia la atenuación de la amplitud de oscilación resulta menor para los péndulos largos que para aquellos de longitudes más cortas.

La conveniencia de medir utilizando un número mayor de oscilaciones tiene como fin disminuir el error sistemático que cometemos al tomar el tiempo. Cada vez que echamos a andar el cronómetro para después detenerlo, cometemos un error debido al tiempo de reacción  $\Delta t$  de nuestro propio cuerpo. Al medir el tiempo que toman  $n$  oscilaciones habremos reducido el error, siguiendo este método, en  $\Delta t/n$ .



Gráfica 2

La gráfica 2 muestra la recta que se obtiene al graficar  $\log s$  versus  $\log T$  de los datos de la tabla.

Una manera muy simple de estimar la pendiente de esta recta, que nos daría el valor del parámetro buscado  $m$ , es escogiendo dos puntos separados en la recta y trazando una recta paralela al eje de las  $x$  desde el punto superior y una recta paralela al eje de las  $y$  desde el punto inferior. Como se muestra en la gráfica 2.

Dividiendo la distancia que existe entre el punto superior y la intersección de las dos rectas que hemos trazado y la distancia que existe entre el punto inferior y la misma intersección se obtiene un valor aproximado para la pendiente. Este valor es  $(-0.220 / 0.218) = -1.009$

Este tipo de aproximación se puede hacer cuando todos los puntos experimentales aparentemente "caen" sobre la recta. Sin embargo un método más formal es el de mínimos cuadrados, mismo que se describe en la sección 4.5.1.

método más formal es el de mínimos cuadrados, mismo que se describe en la sección 4.5.1.

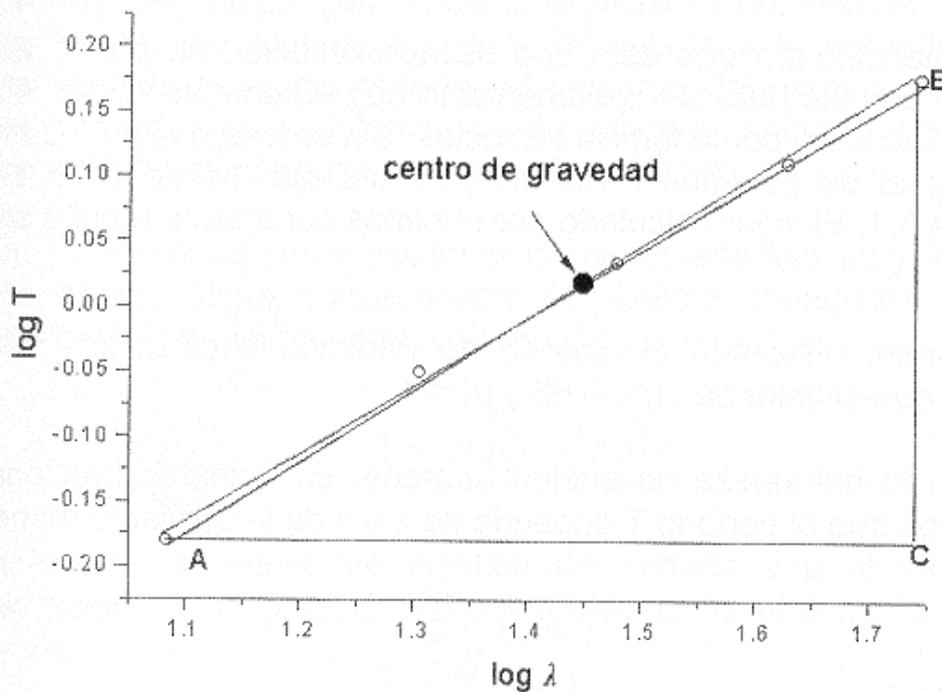
Utilizando el método de mínimos cuadrados se obtiene el mismo valor para  $m = -1.009$  (ver detalles en la sección 4.5.1). En este caso ambos valores han coincidido. Es importante advertir que esta coincidencia de valores no es siempre el caso

Pasando a la segunda parte del experimento, es decir, si ahora  $s$  se mantiene constante y medimos  $T$  para diferentes valores de  $\lambda$ , entonces una gráfica de  $\log T$  versus  $\log \lambda$  tiene una pendiente igual al exponente  $n$ . La tabla 3 nos da las lecturas para  $\lambda$  y para  $T$ . La separación  $s$ , entre los hilos del péndulo, se fijó en 30.0 cm, el período  $T$  se midió tres veces para cada una de las distintas longitudes  $\lambda$  de los hilos.

Tabla 3

$\lambda$ (cm)	Número de oscilaciones	Tiempo (s)				Período  T (s)	Log $\lambda$	Log T
		1	2	3	Promedio			
12.1	40	26.4	26.8	26.5	25.6	0.66	1.0828	-0.1805
20.2	35	31.2	31.2	31.1	31.1	0.89	1.3054	-0.0506
30.1	30	32.2	32.4	32.3	32.3	1.08	1.4786	0.0334
42.4	25	32.6	32.4	32.4	32.4	1.29	1.6274	0.1106
55.5	20	30.0	29.8	29.9	29.9	1.50	1.7443	0.1761
Total.....							7.2385	0.0890
Centro de gravedad.....							1.4477	0.0178

La gráfica 3 representa al  $\log \lambda$  versus  $\log T$  correspondiente a los datos de la tabla 3. Se ha añadido el centro de gravedad.



Gráfica 3

Se puede apreciar que existe una familia de rectas que pasan por el centro de gravedad y "tocan" los puntos experimentales. Esta familia se halla representada por las dos líneas extremas que se muestran en la gráfica 3.

De nuevo, una manera muy simple de estimar el parámetro  $m$  es calculando la pendiente de la línea recta que bisecta a las dos líneas extremas que limitan la familia de rectas. Se considera a esta bisectriz como la mejor aproximación y por lo tanto el valor de su pendiente nos daría el valor del parámetro buscado  $m$ . De manera análoga a la primera parte del experimento, se procede a escoger dos puntos separados en la recta bisectriz y auxiliándonos de una escuadra, se traza una recta paralela al eje de las  $x$  desde el punto superior y una recta paralela al eje de las  $y$  desde el punto inferior. Como se muestra en la gráfica 3.

Dividiendo la distancia que existe entre el punto superior y la intersección de las dos rectas que hemos trazado y la distancia que

existe entre el punto inferior y la misma intersección se obtiene un valor aproximado para la pendiente. Este valor es 0.514

Hemos mencionado que este tipo de aproximación se puede hacer cuando todos los puntos experimentales aparentemente "caen" sobre la o son "tocados" por la familia de rectas. Sin embargo el método más formal es el de mínimos cuadrados, mismo que se describe en la sección 4.5.1. El valor calculado por mínimos cuadrados resulta ser  $m \cong 5.3$

En resumen, utilizando el método de mínimos cuadrados hemos obtenido que el valor de  $n \cong 0.53$  y  $m = -1$ .

Como en la naturaleza no suelen aparecer coeficientes irracionales concluimos que el período T depende de  $\lambda$  y s de la siguiente manera

$$T = \text{cte.} \sqrt{\frac{\lambda}{s^2}}$$

Un análisis teórico del péndulo bifilar nos da un valor par la constante de

$$\text{cte.} = 4\pi \sqrt{\frac{k^2}{g}}$$

donde k es el radio de giro de la varilla que forma el péndulo y g el valor de la aceleración de la gravedad.

Este experimento puede realizarse en principio con una sola masa. Para esto se cuelga una masa cualquiera  $m$  del resorte. La masa experimenta una fuerza (su peso)  $W$  debida a la gravedad y una fuerza debida al propio resorte. Al colgarse del resorte la masa  $m$ , aquel se estira una distancia  $b$ . Se procede ahora a medir dicha elongación  $b$  estimándose su respectivo error  $\Delta b$ .

Posteriormente se hace oscilar a la masa jalándola muy levemente hacia abajo. Como consecuencia el sistema comenzará a oscilar armónicamente con un período  $T$  igual a

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

donde  $k$  es la constante elástica del resorte y  $g$  el valor de la aceleración de la gravedad. Despejando  $g$  se obtiene la siguiente fórmula

$$g = 4\pi^2 \frac{b}{T^2}$$

Ahora se mide el período  $T$ , con el auxilio de un cronómetro. Se estima además el error  $\Delta T$ . Finalmente se procede a calcular  $g$  con la fórmula arriba citada y el valor medido de  $b$ .

La forma más simple de calcular la incertidumbre en  $g$ , que denotaremos por  $\Delta g$ , es empleando los valores de los errores  $\Delta b$  y  $\Delta T$  y empleando las formulas para la propagación de errores dadas en la sección 4.4.2. Estas nos conducen a la expresión para calcular el error relativo  $\Delta g / g$ ,

$$\left(\frac{\Delta g}{g}\right)^2 = \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T^2}{T^2}\right)^2$$

en donde

$$\left(\frac{\Delta T^2}{T^2}\right)^2 = 4 \frac{\Delta T}{T}$$

Este experimento puede realizarse de manera más precisa con varias masas. Para esto se procede a medir las elongaciones  $b_i$  para cada una de las masas  $m_i$  obteniéndose varios valores para  $g$ . A continuación se actúa de manera convencional calculándose el promedio para  $g$  y su correspondiente desviación estándar.

El contar con varias masas nos brinda la oportunidad de investigar que tan válida resulta la aproximación de considerar al resorte con una masa despreciable.

Para esto debemos medir los períodos de oscilación  $T_i$  para cada una de las masas cuyos pesos  $W_i$  conocemos. La relación entre  $T$  y  $W$  está dada por

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{kg}}$$

Aquí usaremos el valor calculado para  $g$  y determinaremos la constante  $k$  a partir de la condición de equilibrio

$$W = kb$$

Si ahora hacemos una gráfica de cada una de los pesos que hemos utilizado  $W_i$  versus los cuadrados de los períodos de oscilación  $(T_i)^2$  esto es,

$$T^2 = 4\pi^2 \frac{W}{kg}$$

entonces, de acuerdo con la expresión anterior obtendríamos una recta que pasa por el origen. Es decir, para  $W = 0$  corresponde  $T^2 = 0$ . Sin embargo si hacemos el experimento par un resorte cuya masa no sea despreciable, observaremos que al extrapolar para  $W = 0$ , la recta de nuestra gráfica no cruza el origen, sino que cruza la ordenada al origen en un punto  $\beta$ , cuyo valor es positivo.

La interpretación que debemos darle es que el resorte sin peso colgado a el actúa como si tuviera una masa implícita en su extremo. A dicha masa la llamaremos masa efectiva del resorte.