Cuaderno de Laboratorio de FÍSICA
Primer curso de Ciencias Químicas
Prácticas de Laboratorio

Departamento de Física Aplicada
Universidad de Huelva

19 de febrero de 2007

Índice general

Capítulo 1

Experiencia con resortes: comprobación de la ley de Hooke

1.1. Fundamento teórico

El objetivo de esta práctica consiste en la verificación de la ley de Hooke y el estudio dinámico de un resorte.

Si se cuelga una masa m del extremo inferior de un resorte metálico helicoidal, éste se alarga hasta que alcanza una nueva posición de equilibrio y el resorte somete a la masa a una fuerza llamada *fuerza recuperadora* . La *ley de Hooke* establece que la fuerza recuperadora es proporcional al *desplazamiento*, esto es, al alargamiento o elongación que experimenta el resorte respecto a la posición de equilibrio. Esto se cumple para deformaciones pequeñas, siempre que no se sobrepase el límite de elasticidad o límite elástico del resorte.

Por tanto, si F es la fuerza aplicada al resorte y x es el desplazamiento, la relación entre ambas cantidades se puede expresar como:

$$F = k\,x \quad , \tag{1.1}$$

donde k es la llamada *constante elástica del resorte* o *constante del resorte*, con dimensiones de fuerza por unidad de longitud. La fuerza recuperadora de un resorte cuando se estira una distancia x tendrá el mismo módulo que la fuerza en la ecuación (1.1), pero con sentido opuesto, lo que indica que la fuerza se opone al desplazamiento x.

Al colgar de un resorte pesas de masa creciente, el peso será igual a la fuerza recuperadora cuando el sistema alcance un estado de equilibrio. Si se miden los desplazamientos para diferentes masas se puede representar una gráfica F-x, cuyo resultado es una recta con pendiente igual a k.

Si se aplica momentáneamente una fuerza adicional a una masa que cuelga en equilibrio de un muelle (por ejemplo, tirando hacia abajo con la mano de la masa) la masa unida al muelle oscilará alrededor de su posición de equilibrio. Este movimiento se realiza bajo la acción de una fuerza neta proporcional al desplazamiento x medido respecto a la posición de equilibrio inicial de la masa m. Por tanto, el movimiento realizado será un *movimiento armónico simple* (M.A.S.) para el que se demuestra que el período es igual a

$$T = 2\,\pi\,\sqrt{\frac{m}{k}}\ . \tag{1.2}$$

Debido a que el resorte también oscila junto a la masa m, la ecuación anterior será correcta en el caso ideal que la masa del mismo fuese nula o despreciable. Si esto no fuera así, habrá que tenerla en cuenta. Se demuestra que, para un resorte uniforme de masa m', la ecuación (1.2) se debe sustituir por

$$T = 2\,\pi\,\sqrt{\frac{m + \frac{1}{3}m'}{k}}\ . \tag{1.3}$$

Por tanto, si representamos el período al cuadrado T^2 frente a la masa m se obtiene una línea recta cuya pendiente y ordenada en el origen estarán relacionadas con k y m' respectivamente.

A partir del período se puede definir la *frecuencia* como el número de ciclos por segundo -o hercios (Hz)-, y se expresa como $f = 1/T$[1]. De esta forma, según las ecuaciones (1.2) y (1.3), si la masa aumenta, el muelle oscila más lentamente; y si el resorte se hace más rígido de manera que k aumente, el muelle oscila más rápidamente. Se puede advertir también que la amplitud de oscilación en un movimiento armónico simple no influye para nada en la frecuencia de oscilación y, por tanto, en el período.

1.2. Objetivos

Los objetivos de la presente práctica son:

- Medida de la constante elástica de un muelle mediante un procedimiento estático.
- Medida de la constante elástica del mismo muelle por medio de un análisis dinámico del resorte. Comprobar que el movimiento resultante de apartar de la posición de equilibrio y soltar un peso colgado del muelle es un movimiento armónico simple.
- Comparación de las constantes elásticas y sus correspondientes incertidumbres obtenidas de las dos formas citadas anteriormente.

[1] Otra notación común para la frecuencia es $\nu = 1/T$.

1.3. Material empleado

- Soporte de trípode, nueces dobles y varilla soporte.
- Pinzas de bureta.
- Muelle.
- Portapesas y juego de pesas.
- Índice.
- Regla milimetrada.
- Cronómetro.
- Célula fotoeléctrica.

1.4. Realización

1. Cuelgue sucesivamente pesas del extremo libre del resorte y anote las elongaciones correspondientes respecto a la posición de equilibrio. Esto habrá de repetirse hasta tener un mínimo de **siete** puntos experimentales, procurando que estos cubran un rango relevante de valores del desplazamiento x.

2. Represéntese gráficamente el peso frente a las correspondientes elongaciones. Obténgase mediante un ajuste de mínimos cuadrados el valor de la constante elástica del muelle y añadase la recta de mejor ajuste a la gráfica con los puntos experimentales.

3. Cuelgue una pesa del extremo inferior del resorte. La masa de esta pesa ha de ser lo suficientemente grande para que el desplazamiento que sufra el muelle permita que este oscile alrededor de la posición de equilibrio alcanzada. A continuación tire suavemente de la pesa hacia abajo, procurando que el resorte no oscile hacia los lados, y suéltela después. Deje que el sistema oscile varias veces hasta que se estabilice el movimiento y, con ayuda del cronómetro y el contador de la célula fotoeléctrica, tome el tiempo que transcurre para un número de oscilaciones determinadas, por ejemplo, unas veinte o veinticinco, teniendo en cuenta que cada oscilación implica dos impulsos en el contador utilizado. Repita el proceso tres para una misma masa.

4. Repita la operación utilizando masas iniciales diferentes hasta obtener de nuevo **siete** puntos experimentales $m - T$.

5. Tras hallar el valor medio del periodo para cada masa, represente en una gráfica T^2 frente a m. Obténgase a partir de la recta de mejor ajuste a los datos experimentales el valor de k y de m' y represéntese la recta de mejor ajuste junto a los datos experimentales.

1.5. Resultados y discusión

El alumno realizará un análisis de los resultados obtenidos, indicando las cantidades medidas y sus errores, teniendo en cuenta la precisión de los instrumentos utilizados así como las leyes experimentales obtenidas.

Se deben realizar dos gráficas (ver figuras 1.1 y 1.2) para representar los datos experimentales, una por cada procedimiento seguido, y obtener mediante los resultados del ajuste de mínimos cuadrados la constante elástica del muelle así como su incertidumbre en ambos casos. Se representará también la recta de mejor ajuste junto a los puntos experimentales obtenidos.

Por último el alumno comparará el valor de k y su incertidumbre asociada que se obtiene con cada método.

1.6. Cuestiones propuestas

Cuestión 1

¿Cuál de los dos procedimientos seguidos para medir la constante del resorte k parece más preciso? ¿ Por qué?

Cuestión 2

A partir de ley de Hooke que se acaba de comprobar, obténgase la expresión de la energía potencial almacenada en el resorte para un alargamiento dado.

Cuestión 3

En el instante que la fuerza deformadora externa cesa, ¿cesa también la fuerza elástica recuperadora? Explíque lo que ocurre a partir de ese instante.

Cuestión 4

Si colgamos un cuerpo con una masa determinada en un resorte con cierta constante elástica y lo dejamos oscilar: ¿Cómo depende el período de oscilación del desplazamiento inicial del cuerpo respecto de la posición de equilibrio?

Cuestión 5

En el mismo montaje que para la pregunta anterior, conforme la masa del cuerpo que oscila es mayor: ¿La frecuencia de oscilación se hace mayor o menor? Razone la respuesta.

Notas

Notas

Cálculo de la constante de un resorte	
Fuerza	Desplazamiento

Cuadro 1.1:

Cálculo de la constante de un resorte					
Masa	NT	NT	NT	$\bar{T}$	$\bar{T}^2$

Cuadro 1.2:

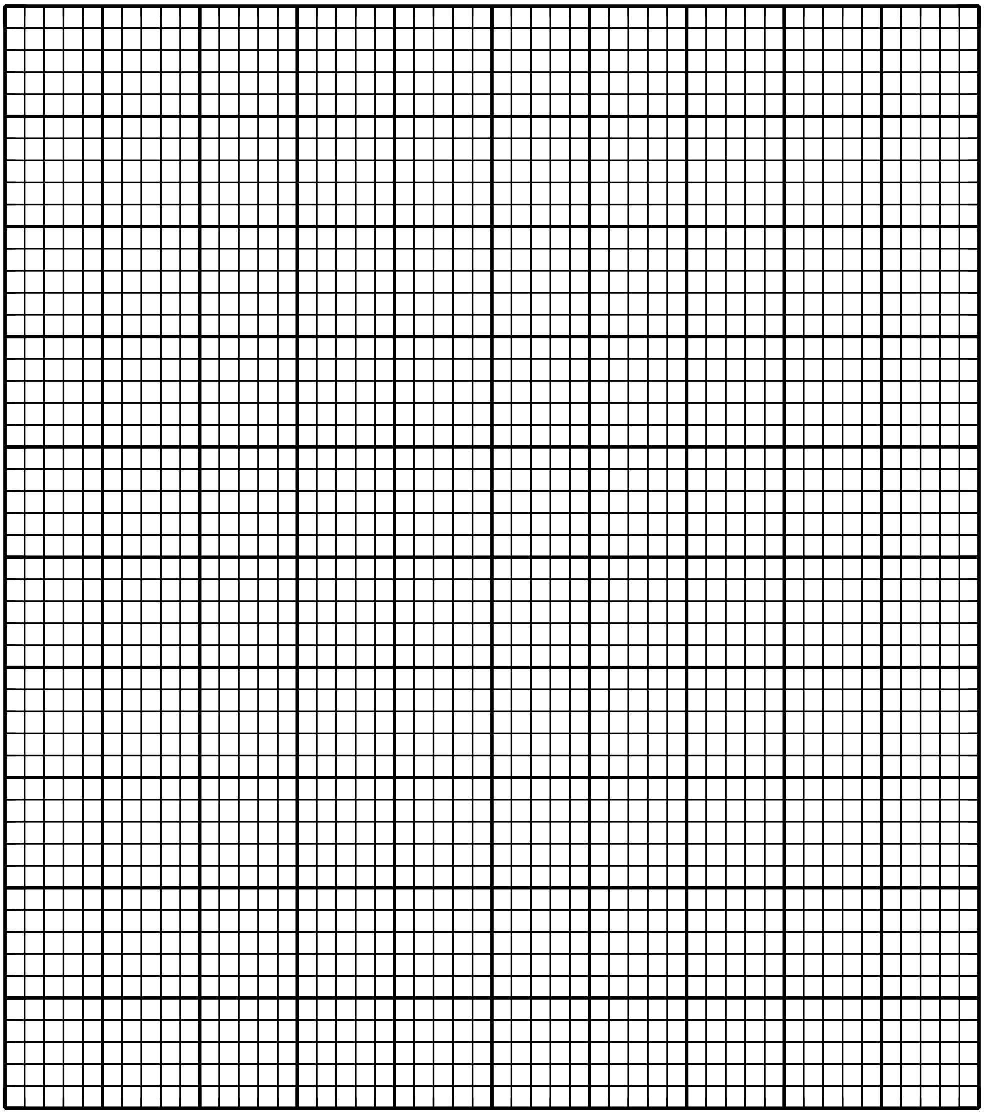

Figura 1.1: Cálculo de la constante de fuerza de un resorte: Fuerza frente a desplazamiento.

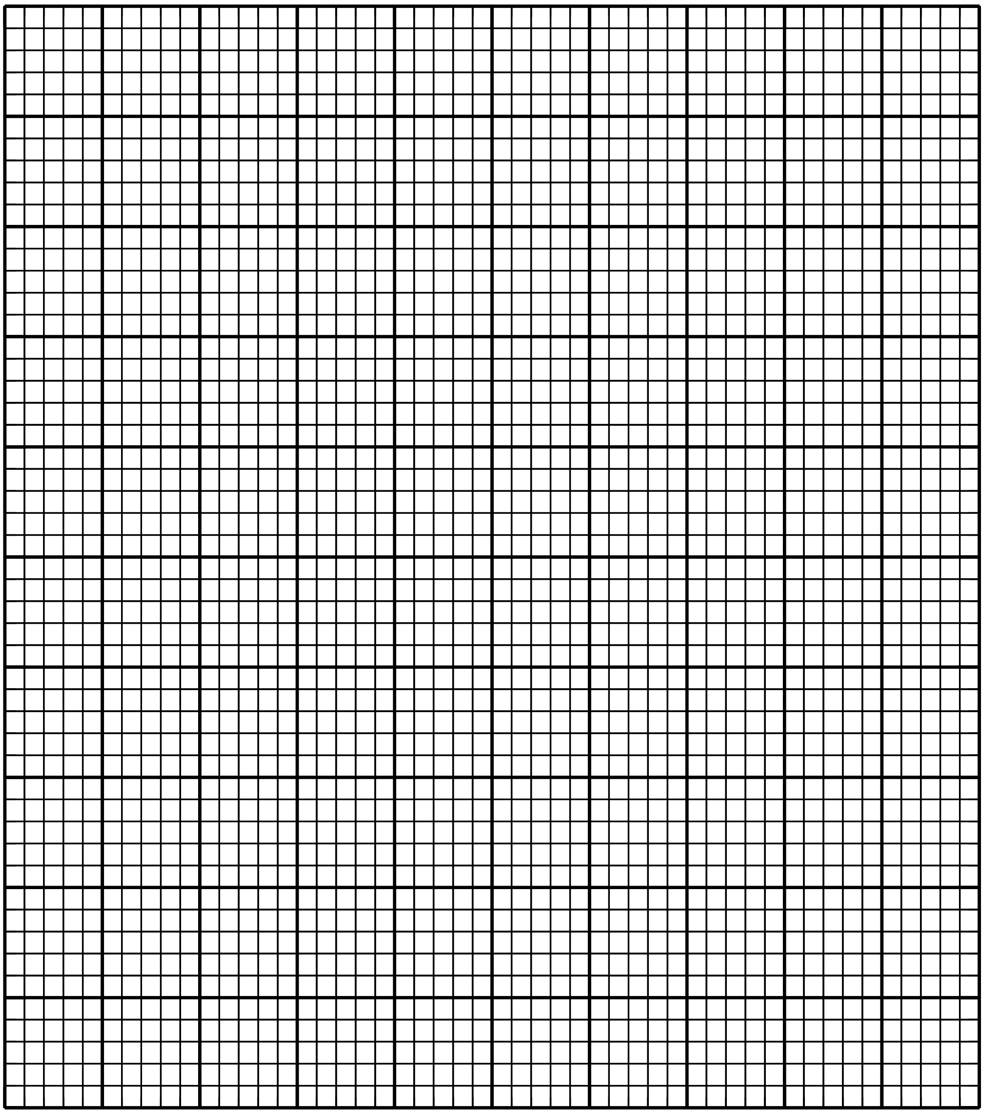

Figura 1.2: Cálculo de la constante de fuerza de un resorte: Periodo al cuadrado frente a masa.

Capítulo 2

Péndulo Físico

2.1. Fundamento teórico

El objetivo de esta práctica consiste en el estudio del **péndulo físico**, también llamado péndulo compuesto, y en el cálculo del valor de la aceleración de la gravedad, g, en el laboratorio utilizando los resultados de la medidas llevadas a cabo con un péndulo físico.

Se define como péndulo físico al sistema formado por un cuerpo rígido que puede oscilar libremente alrededor de un eje horizontal por acción de la gravedad. Véase la figura 2.1.

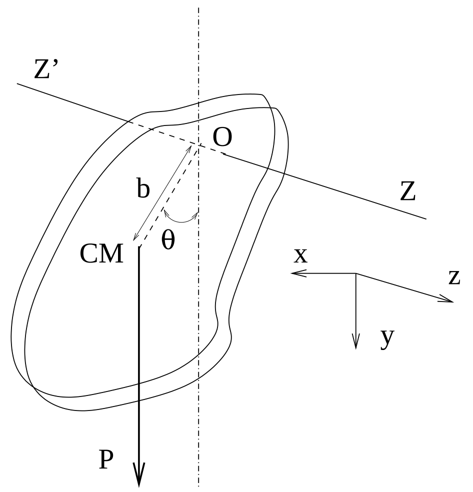

Figura 2.1: Esquema de un péndulo físico.

En la figura 2.1 el cuerpo que oscila alrededor del eje ZZ' y cuyo centro de masa se sitúa en CM tiene un peso $\mathbf{P} = \mathbf{mg\hat{u}_y}$. El centro de masa está a una distancia b de punto O en torno al que oscila el cuerpo y el módulo del momento del peso respecto a este punto es

$$M_z = |\mathbf{b} \times \mathbf{P}| = mgb \sin(\theta) \quad , \tag{2.1}$$

con dirección hacia el sentido negativo del eje Z.

Por la ecuación fundamental de la dinámica de rotación sabemos que

$$M_z = I\alpha \quad , \tag{2.2}$$

donde I es el momento de inercia del sistema y α es la aceleración angular. Por tanto, teniendo en cuenta el sentido del momento podemos escribir, combinando las ecuaciones (2.1) y (2.2) y teniendo en cuenta que la aceleración angular es negativa y que para valores pequeños del ángulo θ podemos aproximar $\sin(\theta)$ por θ

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\frac{Mgb}{I}\theta \quad , \tag{2.3}$$

lo que corresponde a la ecuación de un móvimiento armónico simple, ya que la aceleración es proporcional y con signo opuesto al desplazamiento -angular en nuestro caso- siendo su periodo

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mgb}} \quad , \tag{2.4}$$

Si R es el radio de giro del cuerpo oscilante[1] podemos reescribir el periodo como

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{R^2}{gb}} \quad , \tag{2.5}$$

siendo el periodo independiente de la masa, al igual que ocurre en el caso del péndulo simple, y $l = R^2/b$ la longitud del péndulo simple equivalente.

En nuestro caso vamos a tratar con una varilla homogénea de masa m_1 y longitud L a la que añadimos una pieza de masa m_2 a una distancia b del centro de masa de la varilla. Es en este punto donde colocamos la pieza con masa m_2 donde se sitúa el centro O alrededor del cual oscila la varilla (Ver figura 2.2).

En este caso podemos aplicar el Teorema de Steiner[2] siendo $I = I_{CM} + (m_1 + m_2)D^2$, donde D es la distancia que existe desde el punto O al centro de masa del sistema formado por la varilla de masa m_1 más la pieza de masa m_2. Se puede calcula este momento de inercia total resultando ser

$$I = \frac{1}{12}m_1L^2 + m_1\left(\frac{L}{2} - S\right)^2 \quad , \tag{2.6}$$

[1] Se llama radio de giro (R) de un sólido rígido de masa M a la distacia del eje a la que se puede concentrar toda la masa del sólido dejando invariante su momento de inercia. Por tanto, $I = MR^2$.

[2] Si I_{CM} es el momento de inercia de un sólido rígido de masa M que rota alrededor de un eje que pasa por su centro de masa, el momento de inercia I asociado a un segundo eje, paralelo al primero y a distancia D de este es $I = I_{CM} + MD^2$.

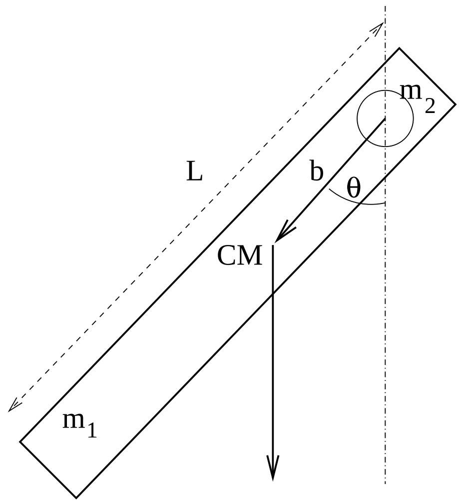

Figura 2.2: Esquema del montaje utilizado en la práctica.

donde S es la distancia desde el extremo más cercano de la varilla al punto O. El periodo resultante sustituyendo en la fórmula (2.4) será

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L^2/12 + (L/2 - S)^2}{g(L/2 - S)}} \quad , \tag{2.7}$$

que elevando al cuadrado y definiendo la variable adimensional $X = S/L$ puede expresarse como

$$T^2 = \frac{2\pi^2 L}{g}\left(\frac{1/3 + (1 - 2X)^2}{1 - 2X}\right) \quad . \tag{2.8}$$

Para llevar a cabo los cálculos más adelante en la práctica

2.2. Objetivos

Los objetivos de la presente práctica son:

- Medida del periodo de un péndulo físico y comprobación de su dependencia con la distancia del eje de giro al CM.

- Medida del valor de la aceleración de la gravedad g con la correspondiente incertidumbre asociada utilizando los valores del periodo anteriormente medidos.

2.3. Material empleado

- Soporte de trípode, barra para masas móviles, nueces dobles, pernos de cuchilla y varillas soporte.
- Regla o cinta métrica.
- Cronómetro.
- Célula fotoeléctrica.

2.4. Realización

1. Se medirá el periodo para al menos diez ubicaciones diferentes de la masa m_2 o, lo que es lo mismo, del punto O alrededor del que se llevan a cabo las oscilaciones. Se comenzará a medir en las cercanías del extremo de la barra y se terminará cerca del centro de la misma.
2. En cada uno de los casos anteriores se medirá (S_i, T_i), siendo S_i la distancia del extremo de la barra al centro de la pieza de masa m_2 y T_i el periodo asociado a dicha configuración. Es necesario equilibrar el montaje de modo que la barra y las cuchillas en las que se apoya sean paralelas entre sí y perpendiculares al suelo.
3. Para medir T_i se girará un ángulo θ pequeño alrededor de O la barra liberándola a continuación. Hay que hacer esto de forma suave para conseguir que la barra oscile en un plano. Se cronometrará el tiempo t invertido en un número N de oscilaciones. Este número depende del valor de S, ya que cuando el periodo se hace más grande las oscilaciones se amortiguan más rápidamente y es necesario tomar un valor de N más pequeño. Se repite este proceso tres veces para cada valor de S.
4. Con los datos experimentales obtenidos se rellena la tabla 2.1, obeteniéndose el periodo para cada valor de S.

2.5. Resultados y discusión

A continuación con los resultados obtenidos el alumno procederá a calcular el valor de la aceleración de la gravedad g en el laboratorio. Para ello hay que tener en cuenta que si se reordenan los términos en la ecuación (2.8) obtenemos

$$T^2(1-2X) = \frac{2\pi^2 L}{3g} + \frac{2\pi^2 L}{g}(1-2X)^2 \quad , \tag{2.9}$$

por lo que si definimos las variables (x, y) como $x = (1-2X)^2$ e $y = T^2(1-2X)$ se observa en la ecuación anterior que existe una relación lineal entre ellas.

Para poner de manifiesto esta dependencia lineal se rellenará la tabla 2.2 y se representarán los puntos experimentales resultantes en la gráfica 2.3.

Tras ello se lleva a cabo la regresión lineal de los datos representados, obetniendo la pendiente, ordenada en el origen, con sus incertidumbres respectivas y el consiguiente coeficiente de correlación del ajuste lineal.

Para terminar se obtendrá el valor de g y su error asociado -teniendo en cuenta el error de la longitud L- tanto a partir del valor de la pendiente como del valor de la ordenada en el origen y se discutirán los resultados obtenidos.

2.6. Cuestiones propuestas

Cuestión 1

Demostrar la fórmula (2.6). ¿Por qué no depende del valor de la masa m_2?

Cuestión 2

Partiendo de las fórmulas (2.4) y (2.6) demuestre que se obtiene la fórmula (2.7).

Cuestión 3

Cuáles serán los valores máximo y mínimo de la variable adimensional $X = S/L$. Represente en la gráfica 2.4 el cuadrado del período del péndulo físico frente a X dado por la fórmula (2.8) y discuta los resultados obtenidos teniendo en cuenta la gráfica resultante.

Notas

Notas

Cálculo del periodo de un péndulo físico						
S ( )	N	t_1 ( )	t_2 ( )	t_3 ( )	$t=\sum_{i=1}^{3} t_i$ ( )	$T=t/3N$ ( )

Cuadro 2.1:

Cálculo de la aceleración de la gravedad				
S ( )	$X = S/L$	T ( )	$x = (1-2X)^2$ ( )	$y = T^2(1-2X)$ ( )

Cuadro 2.2:

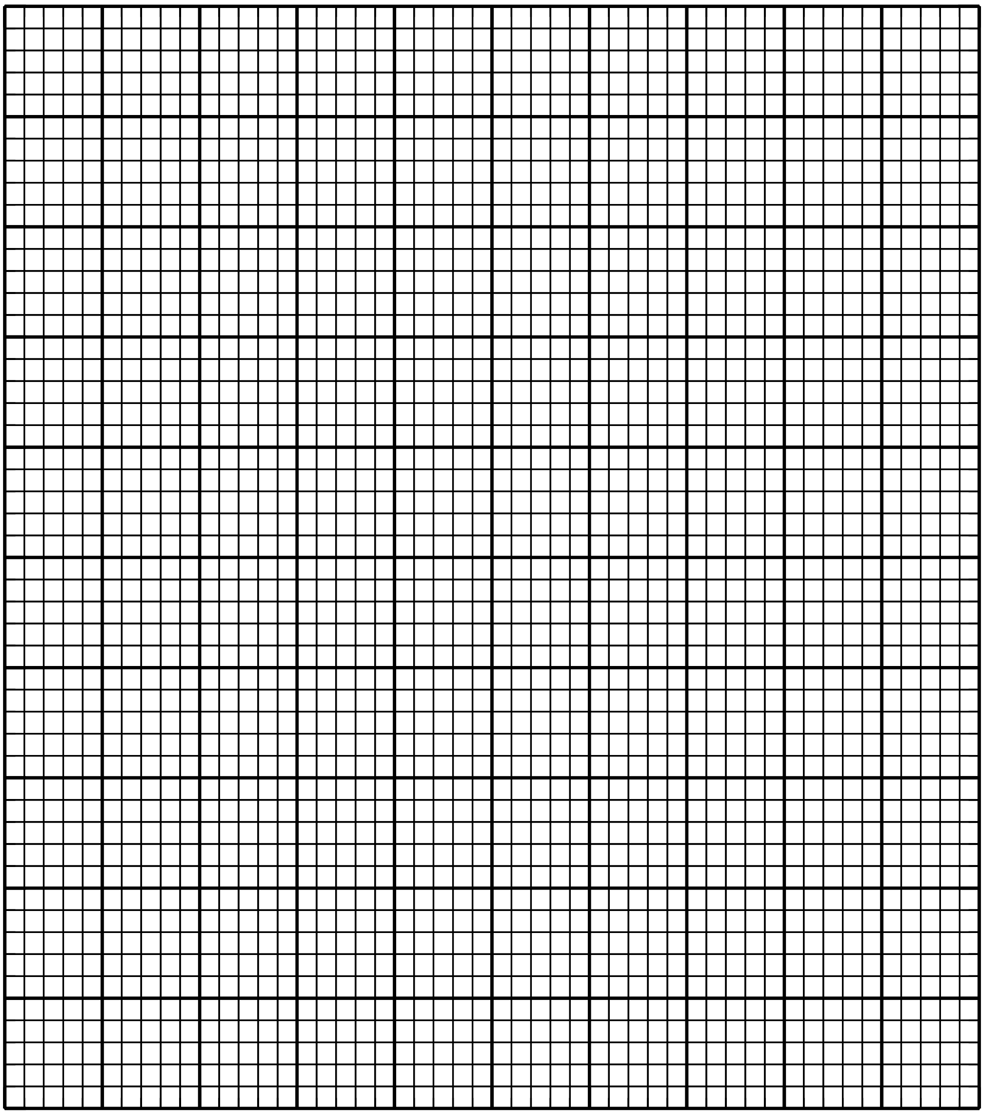

Figura 2.3: Cálculo de la aceleración de la gravedad g: $y = T^2(1-2X)$ frente a $x = (1-2X)^2$.

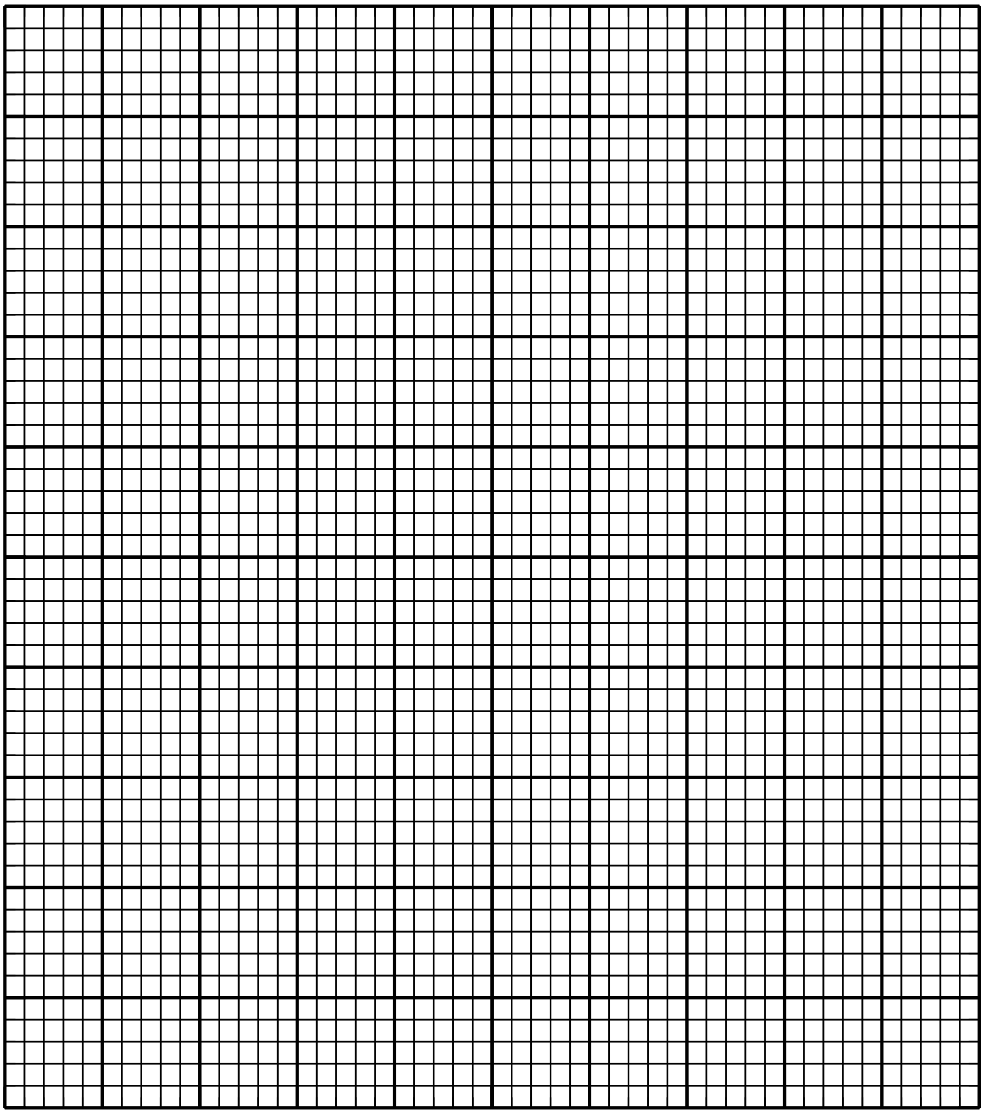

Figura 2.4: Período de un péndulo físico: T frente a S.

Capítulo 3

Calorimetría: Cálculo del equivalente en agua de un calorímetro y del calor específico de un líquido

El objetivo de esta práctica es la familiarización del alumno con algunas leyes básicas de la termodinámica, con el concepto de equivalente en agua de un calorímetro y el cálculo del calor específico de una substancia problema.

3.1. Fundamento teórico

Supongamos que se transfiere una pequeña cantidad de calor δQ entre un sistema de masa m y su entorno. Si esa transferencia de calor hace que el sistema experimente una variación de temperatura dT, se define el **calor específico** (también llamado **capacidad calorífica específica**) del sistema, c, como

$$c = \frac{1}{m}\frac{\delta Q}{dT} \quad . \tag{3.1}$$

Por tanto la cantidad de calor necesaria para aumentar en dT la temperatura de una masa m de nuestro sistema es

$$\delta Q = m\, c\, dT \quad . \tag{3.2}$$

Las unidades más usuales empleadas en el cálculo de calores específicos son J/gK y cal/gK. Para pasar de una a la otra basta recordar que $1\,cal = 4{,}18\,J$. También se usa frecuentemente el **calor específico molar** (o **capacidad calorífica molar**) $C = Mc$, donde M es el peso molecular de la sustancia que estemos estudiando.

Si el calor específico de una substancia es constante en el intervalo comprendido entre las temperaturas T_1 y T_2 entonces se deduce de la fórmula

(3.2) que la cantidad de calor necesaria para llevar un cuerpo de masa m de la temperatura T_1 a la temperatura T_2 es

$$Q = m \int_{T_1}^{T_2} c dT = mc(T_2 - T_1) \quad . \tag{3.3}$$

Si T_2 es menor que T_1, Q es negativo indicando que el sistema libera calor para de este modo disminuir su temperatura[1].

La realización de medidas precisas de **calores específicos** resulta difícil desde un punto de vista experimental pues es casi imposible evitar transferencias de calor no deseadas entre la muestra y su entorno.

Las experiencias calorimétricas se llevan a cabo en **calorímetros**. Estos interfieren con su propia capacidad calorífica en el experimento, por lo que ha de tenerse en cuenta su comportamiento térmico a la hora de realizar los cálculos.

Se define el **equivalente en agua de un calorímetro**, A, como la masa de A gramos de agua que absorbería (o cedería) la misma cantidad de calor que el calorímetro para una misma variación de temperatura.

El cálculo del equivalente en agua de un calorímetro es lo mismo que conocer su capacidad calorífica, que tendrá que tenerse en cuenta cuando tratemos de usar el calorímetro para determinar el calor específico de alguna substancia.

Las medidas en los calorímetros se llevaran a cabo suministrando energía a traves del calor que se disipa en una resistencia por efecto Joule al líquido que se encuentre en su interior. La energía que se suministra por una corriente eléctrica de intensidad I, a una resistencia R (con una diferencia de potencial V en sus extremos) durante un tiempo t

$$E = I^2Rt = VIt \quad . \tag{3.4}$$

Si esta energía se suministra directamente, en forma de calor, a una masa m de una sustancia de calor específico c que se encuentra a una temperatura T en el interior del calorímetro, la temperatura se elevará hasta T' cumpliéndose

$$I^2Rt = VIt = mc(T' - T) \quad . \tag{3.5}$$

3.1.1. Cálculo del equivalente en agua del calorímetro

Para el cálculo del **equivalente en agua** la sustancia que usamos es agua, con calor específico $c_a = 1\, cal/g\, K$. En este caso si añadimos una masa m_0 de agua al calorímetro y reescribimos la ecuación (3.5) teniendo en cuenta la influencia del calorímetro, llamando T_0 a la temperatura inicial y T a la temperatura tras un tiempo t, obtenemos

$$VIt = (m_0 + A)c_a(T - T_0) \quad , \tag{3.6}$$

[1]Este criterio de signos es el llamado *criterio físico*, contrario al *criterio químico*.

donde despejando T nos queda

$$T = T_0 + \frac{VI}{(m_0 + A)c_a} t \quad . \tag{3.7}$$

La dependencia de la temperatura T frente a tiempo t es lineal, luego si medimos la temperatura en diferentes intervalos de tiempo podemos obtener con los datos experimentales la recta de mejor ajuste, y del valor de la pendiente $a = \frac{VI}{(m_0+A)c_a}$ de la misma obtener el equivalente en agua del calorímetro A.

3.1.2. Cálculo del calor específico de una sustancia problema

Si queremos medir el calor específico c_p de una sustancia problema podemos escribir la ecuación (3.5), teniendo en cuenta el equivalente en agua A, como

$$VIt = (m_p c_p + A c_a)(T - T_0) \quad , \tag{3.8}$$

donde m_p es la masa de sustancia problema en el calorímetro. De nuevo la dependencia de T frente al tiempo t es lineal y, con los resultados de la recta de regresión, puede calcularse la capacidad c_p.

3.2. Objetivos

Los objetivos de esta práctica son la familiarización con las principales leyes de la calorimetría y con el concepto de calor específico de una sustancia. Asimismo se introduce el concepto de equivalente en agua y la forma de medirlo así como la medida del calor específico de una sustancia.

3.3. Material empleado

- calorímetro con resistencia calefactora
- termómetro
- polímetro
- fuente de alimentación
- cronómetro
- probeta
- balanza

3.4. Realización

3.4.1. Equivalente en agua

1. Pesar el calorímetro vacío (masa = m_0)

2. Añadir unos 200 cc de agua al calorímetro y pesar de nuevo, obteniendo la masa de agua añadida como la diferencia entre esta pesada y la anterior. También puede llevarse a cabo esta medida directamente haciendo que el cero de la balanza corresponda a m_0.

3. Medir con el polímetro el valor de la resistencia calefactora[2]: R.

   Atención: No conectar la resistencia R sin que esté sumergida pues se quemaría.

4. Colocar el termómetro en el calorímetro, cerrándolo, y medir la temperatura inicial del agua T_0.

5. Ajustar la fuente de alimentación a la tensión de trabajo (entre 9 y 12 V) y poner en marcha el cronómetro simultáneamente al encendido de la fuente.

6. Tomar medidas aproximadamente cada dos minutos de la temperatura del agua, rellenando la tabla 3.6. Tomar como mínimo unas siete u ocho medidas. Es conveniente agitar **suavemente** el calorímetro para tratar de homogeneizar la temperatura del líquido en su interior.

3.4.2. Calor específico substancia problema

1. Añadir un volumen de substancia problema similar al de agua añadido para calcular el equivalente en agua en el paso anterior y pesar obteniendo la masa añadida.

2. Colocar el termómetro en el calorímetro, cerrándolo, y medir la temperatura inicial de la substancia problema: T_0.

3. Ajustar la fuente de alimentación a la tensión de trabajo (entre 9 y 12 V) y poner en marcha el cronómetro simultáneamente al encendido de la fuente.

4. Tomar medidas como en el caso anterior, agitando el calorímetro y rellenando la tabla 3.6.

[2]Este valor puede utilizarse para el cálculo de la potencia disipada por efecto Joule de acuerdo con la fórmula (3.5), aunque es preferible utilizar el producto VI, mediendo I con el polímetro.

3.5. Resultados y discusión

Presentar con su incertidumbre asociada todas las medidas que se hayan llevado a cabo.

Representar gráficamente la variación de la temperatura en el interior de calorímetro con el tiempo, para los dos casos medidos. Siguiendo las instrucciones reseñadas en el fundamento teórico de esta práctica, calcular las rectas de regresión en ambos casos e incluirlas adecuadamente en los gráficos.

A partir del resultado obtenido en el ajuste de mínimos cuadrados de los datos experimentales en el primer caso, calcular el equivalente en agua del calorímetro, con su incertidumbre asociada.

Utilizando el resultado anterior para el equivalente en agua del calorímetro y el ajuste al segundo conjunto de datos experimentales (Tabla 3.6) calcular el calor específico de la substancia problema y su incertidumbre. Discute razonadamente los resultados obtenidos.

3.6. Cuestiones propuestas

Cuestión 1

Si varios cuerpos con diferente capacidad calorífica específica pero la misma masa se colocan junto a un foco calorífico, ¿cuál de ellos se calentará antes hasta una temperatura determinada?

Cuestión 2

¿Qué resulta más conveniente para mantener constante la temperatura de una recinto, rodearlo de agua o de aire? Razona la respuesta.

Cuestión 3

Da cuatro ejemplos diferentes de conversión de energía en calor.

Cuestión 4

La densidad del agua varía levemente con la temperatura. Si nos encontráramos a una temperatura de 47.5 °C ¿Cuál sería la densidad del agua a dicha temperatura? Datos: ρ(46,0°C)0,9989 g/cc y ρ(48,0°C)0,9890 g/cc.

Notas

Notas

Equivalente en agua del calorímetro	
Tiempo	Temperatura

Calor específico substancia problema	
Tiempo	Temperatura

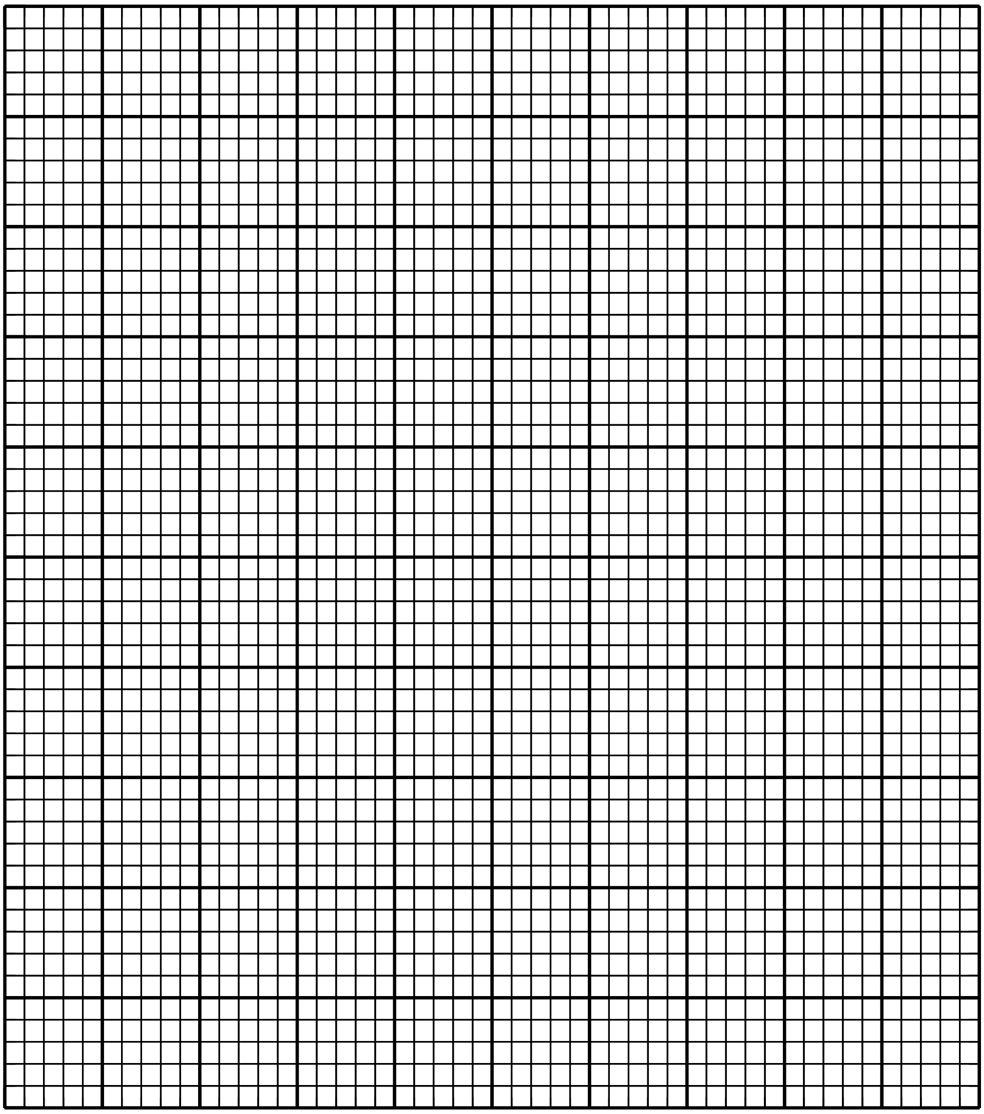

Figura 3.1: Temperatura en función del tiempo para el cálculo del equivalente en agua del calorímetro

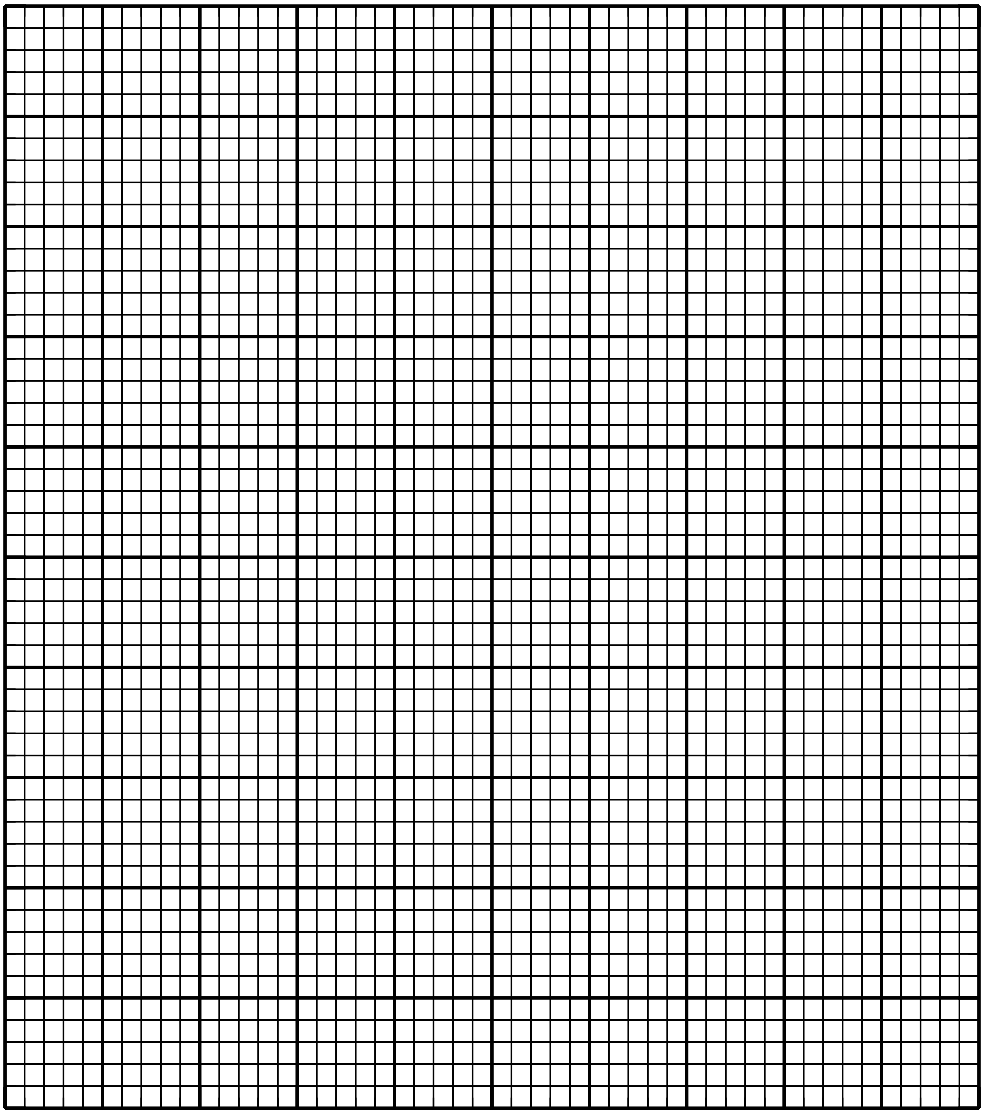

Figura 3.2: Temperatura en función del tiempo para el cálculo del equivalente en agua del líquido problema

Capítulo 4

Determinación del coeficiente adiabático del aire

En esta práctica, se medirá el **coeficiente adiabático**, γ (también llamado κ) del aire. El procedimiento empleado puede utilizarse para medir el coeficiente adiabático de, en general, cualquier gas.

4.1. Introducción

Las transformaciones adiabáticas son de gran importancia en la atmósfera debido a que, por una parte, ciertas evoluciones del aire atmosférico son adiabáticas (cuando el aire asciende o desciende "rápidamente" y con una cantidad de vapor de agua alejada de la saturación, es decir poseyendo una humedad relativa baja) mientras que, por otra parte, a partir de los resultados obtenidos para evoluciones adiabáticas pueden obtenerse resultados para evoluciones *politrópicas* conocido el exponente politrópico o el calor específico de la transformación[1].

4.2. Fundamento teórico

Supongamos que se tiene un recipiente que contiene cierto gas y que dicho recipiente termina en su parte superior en un tubo vertical de forma cilíndrica. Si por el tubo se deja caer una pieza cilíndrica que se ajuste con precisión al tubo de forma que no haya fuga de gases entre la pieza y el tubo, ésta empezará a oscilar alrededor de una posición de equilibrio. Estas oscilaciones pueden entenderse desde el punto de vista cualitativo teniendo en cuenta que a medida que la pieza cae por el interior del tubo, disminuye el volumen del gas que se encuentra en el interior del recipiente, aumentando

[1] Una *evolución politrópica* es un proceso al que se puede asignar una capacidad calorífica constante.

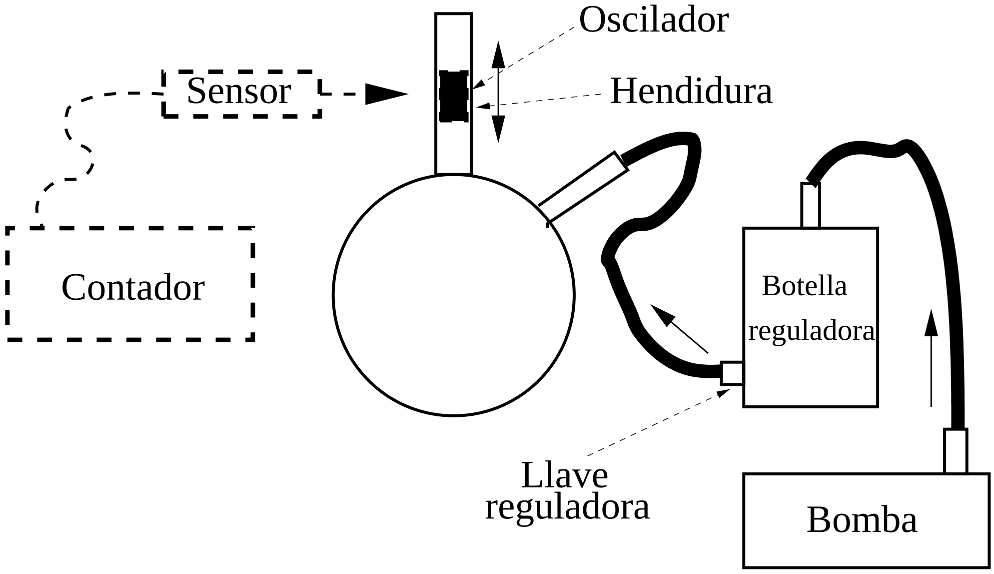

Figura 4.1: Esquema del montaje experimental

por lo tanto su presión. Cuando el aumento de presión es lo suficientemente grande, la pieza se detiene y empieza a ascender. Al sobrepasar la pieza durante su ascenso su posición inicial, la presión del gas disminuye. Cuando la presión es lo suficientemente pequeña, la pieza detiene su ascenso y empieza a caer, completando el ciclo. Puede demostrarse que la aceleración a la que está sometida la pieza, sin más que aplicar la segunda ley de Newton, viene dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{\pi R^2}{m} \Delta P \tag{4.1}$$

donde m es la masa de la pieza cilíndrica, R es su radio, ΔP es la variación de presión producida en el gas debido a las oscilaciones de la pieza y z es la coordenada correspondiente a un eje vertical, orientado hacia arriba y cuyo origen coincide con el punto en el cual se ha abandonado la pieza.

Por otra parte, para una evolución adiabática de coeficiente γ, se cumple que:

$$P\, V^{\gamma} = cte. \tag{4.2}$$

Derivando esta expresión, puede obtenerse que:

$$\Delta P = -\frac{P\,\gamma\,\pi\,R^2}{V}\,\Delta z, \tag{4.3}$$

donde se ha tenido en cuenta,

$$\Delta V = \pi R^2 \Delta z. \tag{4.4}$$

Si suponemos que el proceso de oscilación es lo suficientemente rápido para que no tenga lugar intercambio de calor podemos sustituir ΔP en la expresión (4.1) obteniéndose que:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = -\frac{\pi^2 R^4 P \gamma}{m V} \Delta z \tag{4.5}$$

Esta ecuación describe un movimiento armónico simple ($F = -k\Delta z$) de frecuencia angular:

$$\omega = \pi R^2 \sqrt{\frac{P \gamma}{m V}} \tag{4.6}$$

A partir de esta expresión y teniendo en cuenta $\omega = 2\pi/T$, siendo T el periodo de la oscilación, puede despejarse el coeficiente adiabático γ:

$$\gamma = \frac{4 m V}{T^2 R^4 P} \tag{4.7}$$

donde P es la presión de equilibrio en el interior del recipiente. Esa presión viene dada por:

$$P = P_{\rm atm} + \frac{m g}{\pi R^2} \tag{4.8}$$

El valor de γ obtenido en la práctica puede compararse con el que predice la teoría cinética de los gases:

$$\gamma = \frac{f + 2}{f} \tag{4.9}$$

donde f es el número de grados de libertad de las moléculas del gas:

- gases monoatómicos: f=3 $\Longrightarrow$ γ=1.67
- gases diatómicos: f=5 $\Longrightarrow$ γ=1.40
- gases poliatómicos: f=6 $\Longrightarrow$ γ=1.33

Para el aire se obtiene que γ=1.38 $\pm$ 0.08.

4.3. Objetivos

El objetivo de esta práctica es la medición del coeficiente adiabático del aire, γ y al mismo tiempo la famialiarización del alumno con un típico proceso adiabático en la atmósfera.

4.4. Material empleado

En esta práctica se dispone de los siguientes elementos:

- Un recipiente de vidrio acabado en su parte superior por un tubo cilíndrico vertical.
- Una pieza de plástico (oscilador) que se introducirá en el interior del tubo vertical.
- Una bomba de aire que mantiene la presión en el interior del recipiente anterior.
- Un recipiente de vidrio que debe situarse entre la bomba de aire y el recipiente de vidrio acabado en un tubo vertical. Su función es hacer que la presión creada por la bomba sea más uniforme. Este recipiente intermedio tiene una llave de paso que permite controlar la presión en el interior del recipiente anterior y mantenerla aproximadamente constante.
- Una barrera de infrarrojos que permite detectar los pasos del oscilador y determinar así su periodo.
- Un cronómetro.
- Una balanza.
- Un calibre.
- Un barómetro.
- *Una probeta para medir el volúmen del recipiente de vidrio con tubo vertical.* En realidad la probeta no se usa ya que el volumen del recipiente de vidrio se da como dato a fin de evitar posibles roturas al manipularlo.

4.5. Realización

Para determinar el coeficiente adiabático del aire deben medirse los parámetros que intervienen en la fórmula (4.7).

ATENCIÓN: *El oscilador es una pieza delicada y cualquier choque o daño que sufra afectaría gravemente a la práctica. Hay que tener cuidado de que el oscilador no caiga al suelo ni sufra daño alguno, ya que si se deformara la práctica no se podría realizar en condiciones optimas.*

Téngase en cuenta que para que el oscilador pueda oscilar de forma adecuada debe existir en el dispositivo experimental un elemento adicional, no comentado hasta ahora, que es una hendidura realizada sobre el tubo vertical. Gracias a ella el oscilador podrá bajar después de haber sido empujado hacia arriba por la presión interior. Si esto no fuera así el oscilador se saldría del tubo. Esta hendidura habrá que taparla con un dedo para poder sacar el oscilador del tubo vertical.

- Para empezar, se determina la masa m del oscilador. Se empleará una balanza, siendo suficiente realizar una única pesada.
- Para determinar el diámetro D del oscilador es conveniente realizar cinco medidas desde distintas direcciones y calcular su valor medio así como el error asociado.
- A continuación, se determinará el periodo de oscilación, T. Para ello, se conectará la bomba de aire, se introducirá el oscilador en el tubo vertical con cuidado de que no salga disparado y se operará sobre la válvula hasta que las oscilaciones se estabilicen.
- Es conveniente limpiar cuidadosamente tanto el oscilador como el tubo de vidrio sobre el que se realizarán las oscilaciones.
- **No** introducir el oscilador hasta que la bomba de aire no se conecte y colocar una mano sobre la boca del tubo para evitar que el oscilador salga disparado, retirándola una vez que se estabilicen las oscilaciones.
- Para ver si se han estabilizado las oscilaciones, ajuste la barrera de infrarrojos de forma que su haz quede un poco por debajo del punto superior del movimiento y observe el tiempo entre dos pasos consecutivos del oscilador por el nivel de la barrera. Cuando ese tiempo sea aproximadamente constante, se puede proceder a medir el periodo.
- Para medir el periodo, se ajusta la barrera de infrarrojos para que cuente los pasos del oscilador. Con la ayuda del cronómetro, se mide el tiempo que tarde el oscilador en efectuar un cierto número de oscilaciones y de ahí se obtiene el periodo. Para obtener el periodo con precisión, mida el tiempo que tarda el oscilador en efectuar **500 oscilaciones. Repita cinco veces esta medida y obtenga el valor medio del periodo.**
- Con la ayuda de un barómetro, se determina la presión atmosférica.
- *Por último, nos quedaría por determinar el volumen de equilíbrio del recipiente donde está el oscilador. Para ello, se llenaría el recipiente con agua hasta el nivel de equilibrio del oscilador. A continuación, se volcaría el agua en una probeta y se mediría su volumen. Habría que repitir esta medida cinco veces y obtener el valor medio.* Como ya se explicó anteriormente no se realizarán estas medidas y se tomará como volumen del recipiente, $V = 1020 \pm 5$ ml

- A continuación, se calcula P empleando la fórmula (4.8).

4.6. Resultados y discusión

Presente adecuadamente con sus incertidumbres asociadas, tanto absolutas como relativas, los parámetros medidos. Con todos estos parámetros, determine el valor de γ utilizando la fórmula (4.7) y su incertidumbre. Discuta qué parámetro de los que interviene en la fórmula es más determinante a la hora de reducir el error en la determinación del coeficiente adiabático.

A la hora de realizar los cálculos preste especial atención al uso correcto de las unidades, por ejemplo, trabaje siempre en el Sistema Internacional. Realice la propagación de errores y vea si el valor del error es razonable a la vista del valor de γ.

4.7. Resultados y discusión

Masa del oscilador:

$m =$ __________________________

Radio del oscilador:

Diámetro del oscilador:

$D_1 =$ ____________________ $D_2 =$ ____________________

$D_3 =$ ____________________ $D_4 =$ ____________________

$D_5 =$ ____________________

$\overline{D} =$ __________________________

Radio del oscilador:

$\overline{R} = \overline{D}/2 =$ ____________________ $\sigma_{\overline{R}} = \sqrt{\frac{\sum_i (R_i - \overline{R})^2}{N(N-1)}} =$ ____________________

Periodo del oscilador:

Tiempo que tarda el oscilador en realizar 500 oscilaciones:

$t_1 =$ ________________ $t_2 =$ ________________ $t_3 =$ ________________

$t_4 =$ ________________ $t_5 =$ ________________ $\bar{t} =$ ________________

Periodo del oscilador:

$\overline{T} = \bar{t}/500 =$ ____________________ $\sigma_{\overline{T}} =$ ____________________

Presión en el recipiente del oscilador:

$P_{\text{atm}} =$ ____________________ $\frac{m\,g}{\pi\,\overline{R}^2} =$ ____________________

$P \;=\; P_{\text{atm}} \;+\; \frac{m\,g}{\pi\,\overline{R}^2} =$ ____________________

Volumen del recipiente del oscilador:

$V =$ ________________ $\sigma_{\overline{V}} =$ ____________________

Coeficiente adiabático del aire:

$\gamma =$ ____________________ $\sigma_{\overline{\gamma}} =$ ____________________

4.8. Cuestiones

Cuestión 1

Cuando un gas se expansiona adiabáticamente realiza trabajo sobre el medio externo. Sin embargo, no hay suministro de calor al gas. ¿De dónde proviene la energía?

Cuestión 2

Se comprime muy rápidamente el gas contenido en un cilindro rodeado de una gruesa capa de amianto, elevándose su temperatura en varios cientos de grados celsius. ¿Ha habido transferencia de calor? ¿Se ha incrementado el “calor del gas”?

Cuestión 3

Se lleva a cabo un experiencia de combustión quemando una mezcla de combustible y oxígeno en una "bomba" de volumen constante rodeada de un baño de agua. Durante la experiencia se observa un aumento de la temperatura del agua. Considerando como sistema la mezcla de combustible y oxígeno:

(a) ¿Ha habido transferencia de calor?

(b) ¿Se ha realizado trabajo?

(c) ¿Cuál es el signo de ΔU?

Cuestión 4

La cantidad de agua en un lago puede aumentar por medio de manatiales subterráneos, por aporte de un río y por lluvia. Puede disminuir por causa de varios escapes y por evaporación.

(a) ¿Es correcto preguntar cuánta lluvia hay en el lago?

(b) ¿Sería preferible o razonable preguntar qué cantidad de agua en el lago se debe a la lluvia?

(c) Tomando en cuenta lo anterior y lo que sabes del primer principio de la termodinámica, ¿qué concepto termodinámico equivale a "lluvia en el lago"?

Capítulo 5

Teoría elemental de circuitos: comprobación de la ley de Ohm y de las leyes de Kircchoff

5.1. Fundamento e introducción

5.1.1. Ley de Ohm

La relación entre la tensión, voltaje o diferencia de potencial (V) aplicada a un conductor y la intensidad (I) que circula por él, viene dada por:

$$V = RI, \tag{5.1}$$

donde R es la resistencia del conductor, V se expresa en voltios (V), R en ohmios (Ω) e I en amperios (A).

5.1.2. Conexión de resistencias en serie

Un extremo de una de las resistencias se conecta a uno de la siguiente, el extremo libre de esta segunda se conecta a la tercera, y así sucesivamente, quedando libres un extremo de la primera y otro de la última, que serán los puntos de conexión a la fuente.

La intensidad que pasa por el conjunto de resistencias es la misma que la que circula por cada una de las resistencias, ya que es el único camino por el que pueden circular los electrones. La diferencia de potencial entre los extremos de cada resistencia dependerá de su valor, según la ley de Ohm. La suma de las diferencias de potencial es igual a la diferencia de potencial aplicada al circuito (ver figura 5.1.2).

$$I = I_1 = I_2 = I_3,$$
$$V_1 = R_1 \times I_1 = R_1 \times I,$$

$$
\begin{aligned}
V_2 &= R_2 \times I_2 = R_2 \times I, \\
V_3 &= R_3 \times I_3 = R_3 \times I, \\
V_1 &+ V_2 + V_3 = V.
\end{aligned}
\tag{5.2}
$$

La resistencia equivalente resulta ser la suma de las resistencias utilizadas. Su

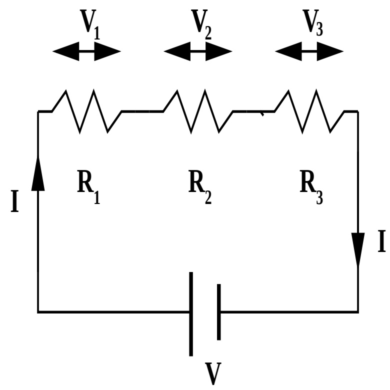

Figura 5.1: Montaje de resistencias en serie.

valor será siempre mayor que el de cualquiera de las resistencias individuales,

$$
\begin{aligned}
V &= R_{eq} I, \\
V &= V_1 + V_2 + V_3 = I \times (R_1 + R_2 + R_3), \\
R_{eq} &= R_1 + R_2 + R_3.
\end{aligned}
\tag{5.3}
$$

5.1.3. Conexión de resistencias en paralelo

Uno de los extremos de cada una de las resistencias se conecta en un mismo punto, los extremos sobrantes se conectan en otro. Ambos puntos serán los que se conecten a la fuente.

La diferencia de potencial que se aplica al circuito es la misma que se aplica a cada una de las resistencias. La intensidad que circula por cada resistencia dependerá de su valor según la ley de Ohm. La suma de las intensidades individuales es igual a la intensidad que circula por el circuito, ya que los electrones que alcancen el conjunto circularán por una u otra resistencia repartiéndose por los diferentes caminos, reuniéndose después,

$$
\begin{aligned}
V &= V_1 = V_2 = V_3 \\
I_1 &= V/R_1; I_2 = V/R_2; I_3 = V/R_3, \\
I &= I_1 + I_2 + I_3.
\end{aligned}
\tag{5.4}
$$

La inversa de la resistencia equivalente resulta ser la suma de las inversas de las resistencias utilizadas. El valor de la resistencia equivalente será

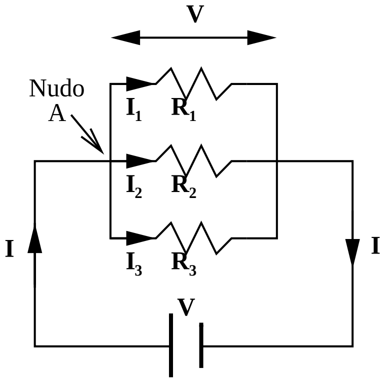

Figura 5.2: Montaje de resistencias en paralelo.

siempre menor que el de cualquiera de las resistencias individuales.

$$
\begin{aligned}
&I = V/R_{eq},\\
&I = I_1 + I_2 + I_3 = V \times (1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3), \qquad (5.5)\\
&1/R_{eq} = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3
\end{aligned}
$$

5.1.4. Leyes de Kirchhoff

Siendo un NUDO el punto de unión de más de dos conductores, una RAMA el conductor entre dos nudos, y una MALLA un conjunto de ramas que formen un circuito cerrado. En un circuito formado por resistencias y generadores de corriente continua se tiene que:

1^a Ley: La suma de las caídas de potencial en una malla es cero. Ejemplo: (Conexión en Serie) $V_1 + V_2 + V_3 - V = 0$.

2^a Ley: La suma algebraica de las intensidades en un nudo es cero. Ejemplo: (Conexión en paralelo nudo A) $I - I_1 - I_2 - I_3 = 0$; considerando positiva la intensidad que entra.

5.2. Objetivos

- Comprobar experimentalmente la ley de Ohm.
- Verificar experimentalmente las leyes de Kirchhoff mediante asociaciones de resistencias.
- Familiarizarse con el uso de una fuente de tensión, y con el manejo de un polímetro utilizado como voltímetro, amperímetro y ohmímetro.
- Medir resistencias experimentalmente a través de un ohmímetro y de la ley de Ohm, y teóricamente empleando el código de colores utilizado para indicar su valor.

5.3. Material empleado

- Cables.
- Panel de montaje.
- Tres resistencias.
- Polímetro.
- Fuente de tensión

5.4. Realización

- MEDIDA DE RESISTENCIAS

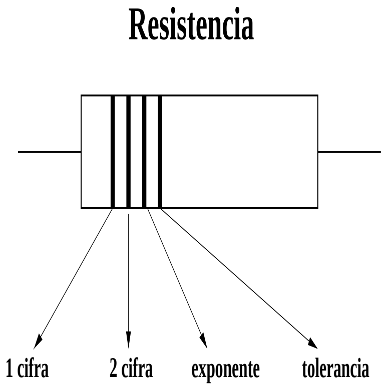

Figura 5.3: Esquema de colores de una resistencia.

El fabricante asegura que el valor de una resistencia está en el rango ($R_{\text{máx}} - R_{\text{mín}}$), donde:

- $R_{\text{máx}} = R + R \times \frac{\text{tol}}{100} = R \times (1 + \frac{\text{tol}}{100})$
- $R_{\text{mín}} = R - R \times \frac{\text{tol}}{100} = R \times (1 - \frac{\text{tol}}{100})$
- R sería el valor medio que se indica mediante un código de colores (ver figura y tabla).
- $R =$ Número formado por 1^a y 2^a cifras $\times\ 10^X \Omega$.
- *tol* se denomina tolerancia, viene en % e indica el % de desviación posible respecto a R.

Determinar el valor de las tres resistencias utilizadas mediante el código de colores y utilizando el ohmímetro; reflejarlo en la tabla siguiente.

COLOR	1^a CIFRA	2^a CIFRA	10^X	TOLERANCIA
NEGRO	0	0	10^0	
MARRÓN	1	1	10^1	
ROJO	2	2	10^2	2 %
NARANJA	3	3	10^3	
AMARILLO	4	4	10^4	
VERDE	5	5	10^5	
AZUL	6	6	10^6	
VIOLETA	7	7	10^7	
GRIS	8	8	10^8	
BLANCO	9	9	10^9	
ORO			10^{-1}	5 %
PLATA			10^{-1}	10 %

Esquema de colores de una resistencia. (Nota: Si la tolerancia es del 20 % no se tiene una 4^a línea. Si la tolerancia es del 2 % (ROJO), la primera línea es la más cercana al borde).

R_{COL}( )	TOL	R_{OHM}( )

- LEY DE OHM.

  Conocido el valor de las tres resistencias anteriores, fije en la fuente un determinado voltaje, **12 V**, y compruebe que se verifica la ley de Ohm en los tres casos midiendo intensidad y voltaje.

R (exp) $\pm\sigma$	V (exp) $\pm\sigma$	I (exp)$\pm\sigma$	R (ley de Ohm)$\pm\sigma$

- ASOCIACIÓN DE RESISTENCIAS EN SERIE (COMPROBACIÓN DE LA LEY DE OHM Y DE LA 1^a LEY DE KIRCHHOFF)
  - Montar el circuito de la figura 1 o uno equivalente.
  - No encender nada hasta que lo revise el profesor.
  - Situar en la fuente una $V_F \approx 16$ V y medir las magnitudes que se indican a continuación, usar para ello, el polímetro como voltímetro para medir los diferentes voltajes. Para medir la R_{eq} utilizar

el mismo polímetro como ohmímetro y conectar el conjunto de resistencias sólo al ohmímetro. Para medir las intensidades emplear el otro polímetro como amperímetro.

- Obtener los valores de las resistencias empleando la ley de Ohm. Indique los errores asociados (σ) al error del aparato. Sean cuidadosos con las unidades, con las cifras significativas y con la coherencia de los resultados.

NOTAS: Respetar el nombre de las resistencias dado anteriormente; así a R_1 le corresponderá V_1, a R_2 V_2 y a R_3 V_3.

(a) Medidas con el voltímetro:

$$V_1 \pm \sigma = \qquad V_2 \pm \sigma = \qquad V_3 \pm \sigma = \qquad V \pm \sigma =$$

(b) Medidas con el amperímetro:

$$I \pm \sigma =$$

(c) Medidas con el ohmímetro:

$$R_{eq} \pm \sigma =$$

(d) Empleo de la ley de Ohm:

$$R_{eq} = V/I =$$

(e) Calcule el error de la R_{eq} empleando que $R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$.

- ASOCIACIÓN DE RESISTENCIAS EN PARALELO (COMPROBACIÓN DE 2^a LEY DE KIRCHHOFF)
  - Montar el circuito de la figura 2 o uno equivalente.
  - No encender nada hasta que lo revise el profesor.
  - Situar en la fuente una $V_F \approx 8$ V y medir las magnitudes que se indican a continuación. Para medir la R_{eq} utilizar el mismo polímetro como ohmímetro y conectar el conjunto de resistencias sólo al ohmímetro. Para medir las intensidades (I_1, I_2, I_3) emplear el mismo polímetro como amperímetro y para medir I usar el otro polímetro como amperímetro.
  - Obtener los valores de las distintas magnitudes siendo cuidadosos con las unidades, con las cifras significativas y con la coherencia de los resultados. Indique los errores asociados (σ), al error del aparato.

NOTAS: Respetar el nombre de las resistencias dado anteriormente; así a la anterior R_1 le corresponderá I_1, a R_2 I_2 y a R_3 I_3.

(a) Medidas con el amperímetro:

$$I_1 \pm \sigma = \qquad\qquad I_2 \pm \sigma =$$
$$I_3 \pm \sigma = \qquad\qquad I \pm \sigma =$$

(b) Medidas con el ohmímetro:

$$R_{eq} \pm \sigma =$$

(c) Empleo de la ley de Ohm:

$$R_{eq} = (1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3)^{-1} =$$

$$R_{eq} = V/I =$$

(d) Calcule el error asociado a R_{eq} empleando las fórmulas del apartado (c) mostrando en detalle los cálculos realizados.

5.5. Cuestiones propuestas

Cuestión 1

En el laboratorio se le proporciona al alumno una resistencia con el siguiente código de colores: **rojo-rojo-rojo-oro**. Con el ohmímetro se mide para dicha resistencia un valor de 2403Ω. ¿Qué tiene que comentar al respecto?

Cuestión 2

Se conecta una resistencia a una fuente de tensión, midiéndose que la diferencia de potencial entre los extremos de la resistencia es de 16,13±0,01 V y que circula una intensidad a través suya de 15,99±0,01 mA. Calcule el valor de la resistencia y su error absoluto. Escriba un número adecuado de cifras significativas y redondee adecuadamente.

Notas

Notas

Bibliografía

[Bai91] D. C. Baird.
Experimentación, una introducción a la teoría de mediciones y al diseño de experimentos. Prentice Hall, 1991.
Una referencia sencilla que permite al estudiante familiarizarse con técnicas de tratamiento de datos y de ajuste de modelos. Escrito en castellano, resulta pedagógico y tiene un nivel accesible. De utilidad para CCAA y CCQQ.

[BLAÁSS02] Rosa Mł Benito, Juan Carlos Losada, Javier Ablanque, and Ángel Santiago Sanz. *Prácticas de laboratorio de Física.* Ariel Practicum, 2002.
Libro sobre prácticas de laboratorio en el que se presentan sesenta y un actividades y treinta y ocho experimentos. La mayoría de estas actividades han sido proyectadas para que el alumno profundice en la comprensión de algún concepto bien definido. Los experimentos se han diseñado, en general, para que los alumnos adquieran práctica en la utilización de algún aparato en especial. De utilidad para CCAA y CCQQ.

[GR01] S. Gil and E. Rodríguez. *Física re-Creativa.* Prentice Hall (Buenos Aires), 2001.
Atractiva referencia, especialmente dirigida al docente, en la que se plantean diferentes experimentos de Física con especial atención al uso de recursos informáticos en las mismas.

[Phy06] AG Phywe. *Catálogo PHYWE de prácticas de laboratorio.* -, 2006.
Catálogo de prácticas de la empresa alemana PHYWE en el que se presenta de forma breve los guiones y montaje de las prácticas de laboratorio ofertadas por dicha empresa. Resulta interesante para el docente a la hora de elaborar los guiones de prácticas.