



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD IZTAPALAPA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**

DQ.0343.2025

Octubre 01, 2025

**Dr. Román Linares Romero
Presidente del Consejo Divisional
de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería
PRESENTE**

A través de este medio le solicito incluir en el orden del día de la próxima sesión del Consejo Divisional el informe sabático de la Profesora Patricia Villamil Aguilar, del Área Académica de Catálisis. Dicho informe sabático comprende el período de 14 meses a partir del 17 de julio de 2024.

Agradezco su atención a esta solicitud y le envío un cordial saludo.

Atentamente
Casa abierta al tiempo



**Dr. Juan Marcos Ésparza Schulz
Jefe del Departamento de Química**



UNIDAD IZTAPALAPA

División de Ciencias Básicas e Ingeniería
Departamento de Química

Ave. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186. Col. Leyes de Reforma 1A Sección. Iztapalapa C.P. 09310. CdMx, México.
Apartado Postal 55-534.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

CONSEJO DIVISIONAL DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERIA

INFORME DE PERÍODO SABÁTICO

DATOS GENERALES

Nombre del profesor: Ruth Patricia Villamil Aguilar N° empleado: 568

Departamento: Química Área: Catalisis

Teléfono particular: [REDACTED] Extensión UAM-I: [REDACTED] E-mail: [REDACTED] @Xenun-uam.mx

DATOS DEL PERÍODO SABÁTICO SOLICITADO

N° meses solicitados: 14 Fecha de inicio: 15/07/2024 Fecha de terminación: 14/09/2025

Institución donde se realizará: UAM-I

Depto., Laboratorio, etc.: Química Catalisis

Domicilio de la institución: Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco #186 Iztopalapa

Teléfono: [REDACTED] Fax: [REDACTED] E-mail: [REDACTED]

OBJETIVOS DEL PERÍODO SABÁTICO

Elaborar un manual de actividades experimentales relacionadas a diferentes UEA de la licenciatura en Química

METAS ALCANZADAS EN EL PERÍODO SABÁTICO

☒ Memorias in extenso en libro de resúmenes* ☐ Artículos de investigación en revista indexada* ☐ Presentaciones en congresos

☐ Libros o capítulos de libros ☐ Grado ☐ % Avance de estudios de posgrado

☐ Otros (especifique): Manual de Actividades Experimentales

* Indicar en anexo si se trata de trabajo publicado, aceptado o sometido

TIPO DE ACTIVIDADES ACADÉMICAS DESARROLLADAS

(Indique aquellas relacionadas con las actividades desarrolladas)

☐

Investigación

☒

Docencia

☐

Difusión

☐

Formación académica

☐

Formación profesional

☐

Entrenamiento técnico

☐

Otros (especifique): _____

RESUMEN DEL PLAN DE ACTIVIDADES ACADÉMICAS DESARROLLADAS

(El llenado de esta sección no sustituye el informe detallado de actividades)

Se entregan un conjunto de 25 actividades experimentales relacionadas a los contenidos temáticos de diferentes UFA del plan de estudios de la licenciatura en Química que requieren de actividades experimentales

PARA USO DEL JEFE DE DEPARTAMENTO

Después de haber evaluado el informe detallado de actividades del período sabático del interesado según los lineamientos establecidos para tal efecto; informo al Consejo Divisional que:

☒

Los objetivos SE cumplieron satisfactoriamente

☐

Los objetivos SE cumplieron parcialmente

☐

Los objetivos NO se cumplieron

☐

NO se cumplió el propósito del sabático



Firma del Jefe de Departamento

22/10/2025

Fecha

PARA USO DEL CONSEJO DIVISIONAL

El Consejo Divisional, en su Sesión No. _____ del _____ sobre el Período sabático del interesado acordó que:

☒

Los objetivos SE cumplieron satisfactoriamente

☐

Los objetivos SE cumplieron parcialmente

☐

Los objetivos NO se cumplieron

☐

NO se cumplió el propósito del sabático

Secretario del Consejo Divisional

*Además de este formato-resumen, el interesado deberá entregar su Informe detallado de actividades junto con la documentación probatoria correspondiente.

Ciudad de México, a 7 de octubre del 2025

Al Honorable Consejo Divisional de CBI

UAM-I

Presente

Me dirijo a ustedes para presentar el informe de actividades realizadas durante el periodo sabático que acabo de concluir el 14 de septiembre del 2025.

De acuerdo a la propuesta original, este periodo de 14 meses lo dediqué a la elaboración de 25 actividades experimentales relacionadas al contenido de algunas UEA del plan de estudios de la Licenciatura en Química que incluyen la realización de actividades experimentales en el laboratorio.

Para su presentación se eligió un formato común con la finalidad de tener contemplados los objetivos generales y particulares de cada actividad, el marco teórico que fundamenta al experimento, el instrumental y equipo requerido para su realización, la descripción detallada del desarrollo del experimento, los resultados esperados y cómo analizarlos y cuáles serían las conclusiones esperadas.

Estas actividades experimentales pueden ser incluidas en los laboratorios de diferentes UEA del plan de estudios como son, Química, Química Inorgánica, Química orgánica, Química Analítica y Método Experimental II.

Atentamente


Ruth Patricia Villamil Aguilar 

Departamento de Química

DCBI

UAM-I

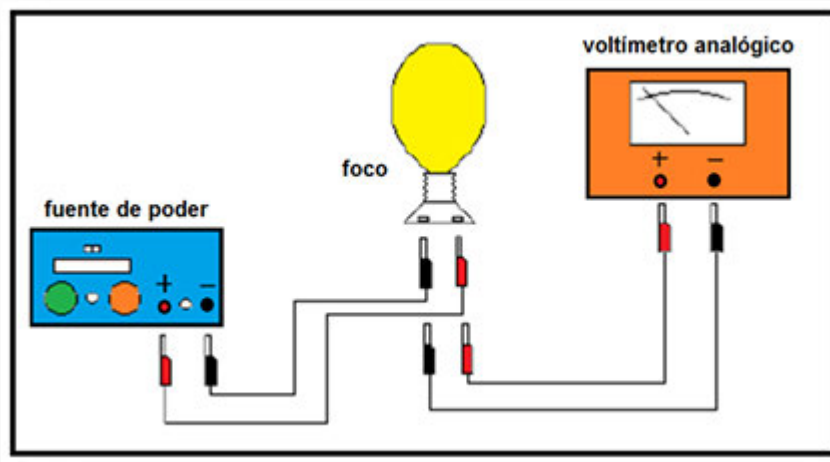

VoBo Dr Juan Marcos Esparza Schulz

Jefe del Departamento de Química

UAM-I

Actividad experimental 1

Caracterización de un voltímetro analógico



Objetivos de aprendizaje

- Determinar el rango, la resolución y la legibilidad del voltímetro (características estáticas).
- Calcular la precisión y la exactitud del voltímetro para cada valor patrón en el rango de experimentación.
- Determinar la incertidumbre para las mediciones de cada valor patrón utilizado.
- Determinar los valores más representativos para los valores patrones utilizados incluyendo sus incertidumbres.
- Obtener la curva de calibración y su ecuación para el voltímetro bajo estudio.
- Determinar la sensibilidad y el error de calibración del voltímetro.

Material y equipo

- fuente de poder de 0 hasta 30 [V] con 5 [A] máximo, con voltímetro digital integrado
- voltímetro analógico de 0 a 50 [V]
- foco incandescente de 60 [W]
- base para foco con cables de conexión
- cuatro cables de conexión cortos

Desarrollo de las actividades

Actividad 1

Analice el voltímetro por caracterizar y registre sus características estáticas. Verifique el ajuste a cero del voltímetro y, de ser necesario, haga el ajuste mecánico con el tornillo colocado al centro de la parte inferior de la carátula, como se indica en la figura 1.1.



Figura 1.1. Voltímetro analógico.

Tabla 1.1

Marca	Modelo	Rango	Resolución	Legibilidad

Actividad 2

Arme el circuito mostrado en la figura 1.2, sin poner en funcionamiento la fuente de poder y verifique que las perillas de corriente y voltaje estén totalmente giradas en sentido contrario al movimiento de las manecillas del reloj.

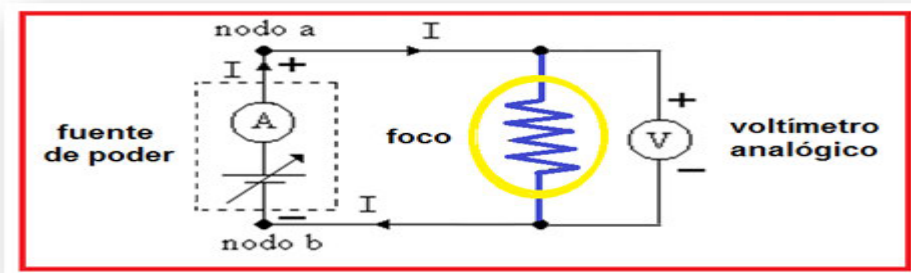
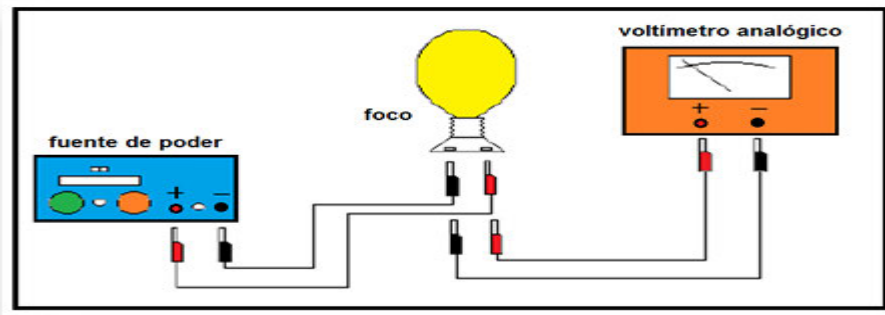


Figura 1.2. Dispositivo experimental.

Actividad 3

Encienda la fuente y con giros pequeños de las dos perillas gradúe los valores de la diferencia de potencial (voltaje) aplicada al foco, en el circuito; tome el valor del voltímetro digital como el valor patrón y a la lectura realizada en el voltímetro analógico como el valor leído. Calcule el valor leído promedio, la desviación estándar y el valor más representativo con su incertidumbre para cada valor patrón utilizado. Complete la tabla 1.2.

Tabla 1.2

V_P [V]	V_{L1} [V]	V_{L2} [V]	V_{L3} [V]	V_{L4} [V]	V_{L5} [V]	$\overline{V}_L$ [V]	S_v [V]	$\overline{V}_L \pm \Delta V$ [V]
2.5								
4.5								
6.5								
8.5								
10.5								
12.5								

Nomenclatura

V_P : valor patrón.

$\overline{V}_L$: valor leído promedio.

ΔV : incertidumbre para las mediciones de cada valor patrón utilizado.

$\overline{V}_L \pm \Delta V$: valor más representativo con su incertidumbre.

S_v : desviación estándar.

Actividad 4 Con el valor patrón y el valor leído promedio obtenido, realice los cálculos necesarios y complete la tabla 1.3.

Tabla 1.3

V_P [V]	$\overline{V}_L$ [V]	% EE	% E	% EP	% P
2.5					
4.5					
6.5					
8.5					
10.5					
12.5					

Nomenclatura

V_P	: valor patrón.
$\overline{V}_L$	: valor leído promedio.
% EE	: porcentaje de error de exactitud.
% E	: porcentaje de exactitud.
% EP	: porcentaje de error de precisión.
% P	: porcentaje de precisión.
ΔV	: incertidumbre para las mediciones de cada valor patrón utilizado.
$\overline{V}_L \pm \Delta V$	: valor más representativo con su incertidumbre.

Actividad 5

Ubique en una gráfica los puntos experimentales obtenidos del valor leído promedio en función del valor patrón

Cuestionario

1. ¿Para qué valor de **VP** el voltímetro presenta menor error de exactitud?
2. ¿Para qué valor de **VP** el voltímetro presenta menor error de precisión?
3. Realice la gráfica de la curva de calibración; tome al Valor patrón (**VP**) como la variable independiente.
4. Obtenga la ecuación de la curva de calibración indicando las unidades de cada término en el SI.

5. ¿Cuál es la sensibilidad del voltímetro y su error de calibración, cada uno con sus unidades correspondientes en el SI?

6. Conclusiones

7. Bibliografía

Gutiérrez Aranzeta, Carlos; Introducción a la metodología experimental, 2da.

Edición, México, Limusa Noriega, 2006.

Young H. D. y Freedman R. A.; "Sears y Zemansky FÍSICA UNIVERSITARIA CON FÍSICA MODERNA" Vol. 2; Editorial Pearson; 13ª edición; México, 2014.

8. Anexo

Expresiones matemáticas

$$\%EE = \left| \frac{V_P - \hat{V}_L}{V_P} \right| \times 100 \qquad \%E = 100 - \%EE$$

$$\%EP = \left| \frac{\hat{V}_L - V_{+a}}{\hat{V}_L} \right| \times 100 \qquad \%P = 100 - \%EP$$

Desviación estándar de una muestra de "n" mediciones de una misma cantidad física:

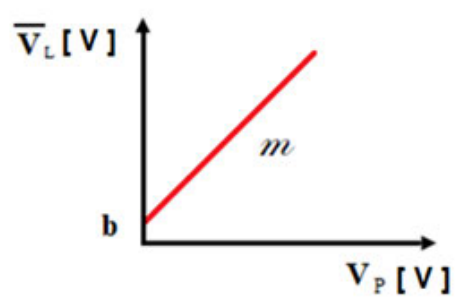
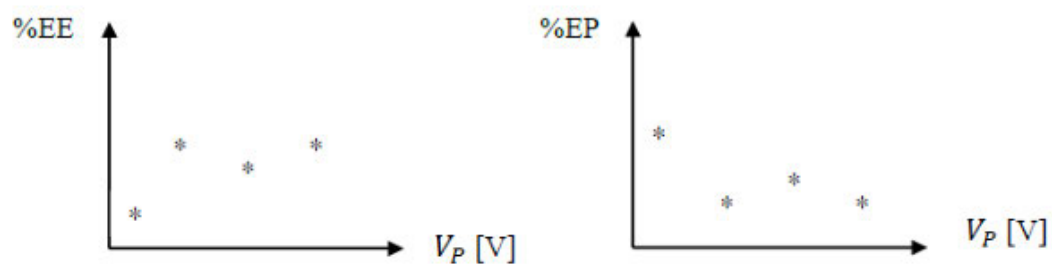
$$S_V = \pm \left[\frac{\sum_{j=1}^n (\bar{V}_L - V_j)^2}{n-1} \right]^{1/2} \qquad y \qquad \Delta V = S_{mV} = \frac{\pm S_V}{\sqrt{n}};$$

$$[\Delta V]_u = [S_{mV}]_u = [S_V]_u$$

Expresiones del método de la suma de los cuadrados mínimos:

$$m = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \qquad b = \frac{(\sum y_i)(\sum x_i^2) - (\sum x_i y_i)(\sum x_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

Modelos gráficos

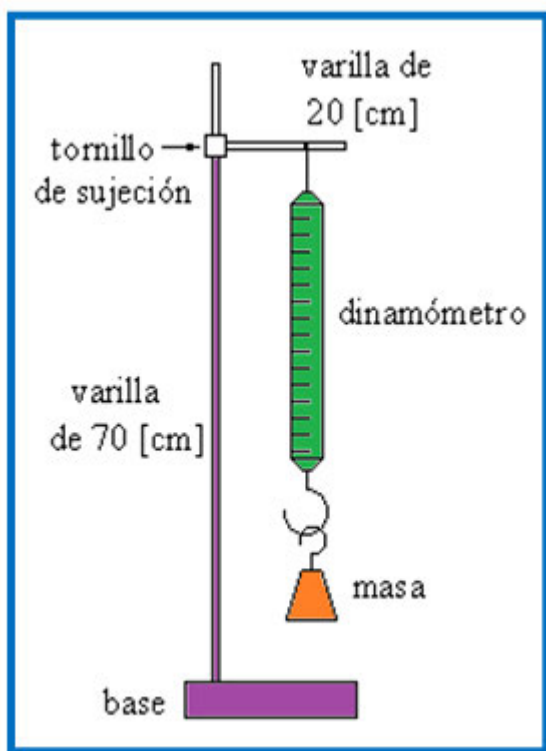


Modelo matemático

$$\overline{V}_L[V] = m [1]V_P [V] + b [V]$$

Actividad experimental 2

Caracterización de un dinamómetro



1. Seguridad en la ejecución

	Peligro o fuente de energía	Riesgo asociado
1	Peso de las masas patrón	Al manipular las masas inadecuadamente se pueden caer y causar daños.

2. Objetivos de aprendizaje

- Determinar las características estáticas del dinamómetro empleado.
- Determinar el error de exactitud (%EE) y el porcentaje de exactitud (%E) del dinamómetro para cada valor patrón.
- Determinar el error de precisión (%EP) y el porcentaje de precisión (%P) del dinamómetro para cada valor patrón.
- Determinar la incertidumbre para las mediciones de cada valor patrón utilizado.
- Determinar los valores más representativos para los valores patrones utilizados incluyendo sus incertidumbres.
- Obtener los modelos gráfico y matemático de la curva de calibración.

g) Identificar el significado físico de la pendiente y el de la ordenada al origen de los modelos de la curva de calibración.

3. Material y equipo

- dinamómetro de 0 a 10 [N]
- masa de 50 [g]
- masa de 100 [g]
- masa de 200 [g]
- base de soporte universal
- varilla de 70 [cm]
- varilla de 20 [cm]
- tornillo de sujeción

4. Desarrollo de las actividades

Actividad 1

Analice el dinamómetro y registre sus características estáticas. Llene la tabla 2.1

Tabla 2.1

Marca	Rango	Resolución	Legibilidad

Actividad 2

Verifique el ajuste a cero del dinamómetro, éste puede realizarse al aflojar la tuerca superior y girar el gancho del soporte hasta que la parte media del indicador marque cero, una vez hecho esto apretar la tuerca superior para asegurarlo. Coloque el dinamómetro en el soporte universal para realizar las mediciones, como se indica en la figura 2.1

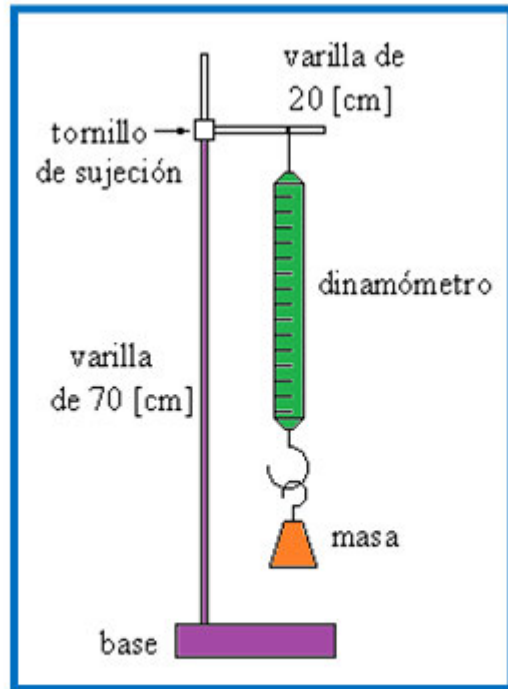


Figura 2.1. Dispositivo experimental del dinamómetro.

Actividad 3

Calcule el módulo del peso patrón **WP** de cada masa patrón **mP**, aplicando la segunda ley de Newton ($WP = mP g$) y el módulo del valor de la aceleración gravitatoria local ($g = 9.78 \text{ [m/s}^2\text{]}$). Llene la tabla 2.2.

Tabla 2.2

m_p [g]	m_p [kg]	W_p [N]
50		
100		
150		
200		
250		
300		
350		

Nomenclatura

W_p : peso patrón [N].
 m_p : masa patrón [kg].

Actividad 4

Cuelgue en el dinamómetro las masas patrones de manera sucesiva y registre el peso leído de cada una; efectúe las mediciones en forma creciente y luego decreciente hasta completar las cuatro columnas (WL1, WL2... WL5). Copie el peso patrón de la tabla 2.2 y complete la tabla 2.3.

Tabla 2.3

W_p [N]	W_{L1} [N]	W_{L2} [N]	W_{L3} [N]	W_{L4} [N]	W_{L5} [N]	$\overline{W}_L$ [N]	S_v [N]	$\overline{W}_L \pm \Delta W$ [N]

Nomenclatura

- W_p : valor del módulo del peso patrón [N].
- $\overline{W}_L$: valor del peso leído promedio [N].
- S_v : desviación estándar.
- $\overline{W}_L \pm \Delta W$: valor más representativo con su incertidumbre.
- ΔW : incertidumbre para las mediciones de cada peso patrón utilizado.

Actividad 5

Para cada peso patrón calculado, complete los datos solicitados en la tabla 2.4.

Tabla 2.4

W_p [N]	$\overline{W}_L$ [N]	%EE	%E	%EP	%P

Nomenclatura

- W_p : peso patrón [N].
- $\overline{W}_L$: peso leído promedio [N].
- % EE : porcentaje de error de exactitud.
- % E : porcentaje de exactitud.
- % EP : porcentaje de error de precisión.
- % P : porcentaje de precisión.

Actividad 6

Ubique en una gráfica los puntos experimentales obtenidos del peso leído promedio en función del peso patrón.

5. Cuestionario

- 1.- Realice la gráfica del porcentaje de error de exactitud en función del valor patrón e indique ¿para qué valor patrón se tuvo el mayor error de exactitud?
- 2.- Realice la gráfica del porcentaje de error de precisión en función del valor patrón e indique ¿para qué valor patrón se presentó el mayor error de precisión?
- 3.- Realice el modelo gráfico de la curva de calibración. Indicando las unidades de cada término en el SI.
- 4.- Obtenga el modelo matemático de la curva de calibración, indicando las unidades de cada término en el SI.

5.- Para cada término del modelo matemático del inciso anterior indique si es constante, variable independiente o variable dependiente y escriba su expresión dimensional en el SI.

6.- Conclusiones

7.- Bibliografía

Young H. D. y Freedman R. A.; “Sears y Zemansky FÍSICA UNIVERSITARIA CON FÍSICA MODERNA” Vol. 2; Editorial Pearson; 13ª edición; México, 2014.

8.- Anexo: Expresiones matemáticas

$$W_p = m_p g \quad \text{en la cual} \quad |\vec{g}| = 9.78 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

$$\%EE = \left| \frac{V_p - \hat{V}_L}{V_p} \right| \times 100 \quad \%E = 100 - \%EE$$

$$\%EP = \left| \frac{\hat{V}_L - V_{+a}}{\hat{V}_L} \right| \times 100 \quad \%P = 100 - \%EP$$

Desviación estándar de una muestra de “n” mediciones de una misma cantidad física:

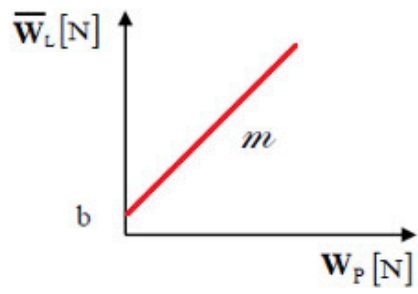
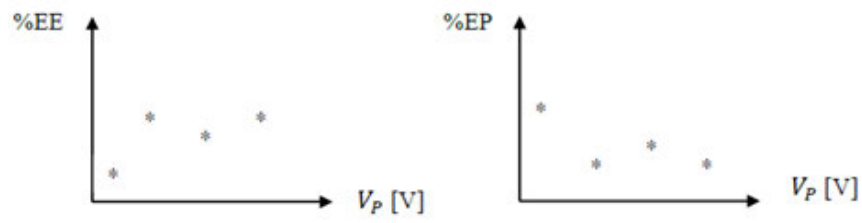
$$S_W = \pm \left[\frac{\sum_{j=1}^n (\bar{W}_L - W_j)^2}{n-1} \right]^{1/2} \quad \text{y} \quad \Delta W = S_{mW} = \frac{\pm S_W}{\sqrt{n}} ;$$

$$[\Delta W]_u = [S_{mW}]_u = [S_W]_u$$

Expresiones del método de la suma de los cuadrados mínimos:

$$m = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad b = \frac{(\sum y_i)(\sum x_i^2) - (\sum x_i y_i)(\sum x_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

Modelos gráficos



Modelo matemático

$$\bar{W}_L [N] = m [1] W_P [N] + b [N]$$

Actividad experimental 3

Mide la velocidad del sonido en el aire y diviértete con los tubos sonoros

Introducción

La música ofrece un punto de partida muy interesante y accesible para poner en contexto los conceptos de física que tienen relación con las ondas y la propagación de sonidos. En este trabajo nuestro objetivo es proponer una iniciativa que permite realizar una ejecución musical en grupo con la participación de un gran número de personas, utilizando tubos de PVC. Además, esta experiencia nos acerca de forma cuantitativa a los fenómenos físicos involucrados en la generación del sonido con instrumentos de viento, realizando una medida de la velocidad del sonido.

El origen de cualquier sonido son las vibraciones. Cualquier cuerpo que vibre se convierte en una fuente sonora y esa vibración, transmitida a través del medio, generalmente el aire, llega hasta el receptor que oye el sonido y lo procesa. Los instrumentos musicales están pensados para producir sonidos con una intensidad audible. Por ello, además de contar con algún mecanismo excitador que produzca el sonido, cuentan con una caja de resonancia que pone en vibración todo el aire que se encuentra en su interior. En los instrumentos de viento el mecanismo excitador que hace vibrar el aire puede ser la lengüeta (como en el oboe, el clarinete y el saxofón), los labios del músico (trompeta) o los remolinos que se forman al soplar o forzar la entrada de aire (órgano, flauta). Además, la forma del tubo selecciona y amplifica determinados armónicos a costa de otros, contribuyendo al timbre característico de cada instrumento. El modelo físico más sencillo para representar un instrumento de viento es el modelo de tubo cilíndrico, especialmente idóneo para describir flautas, tubos de órgano, o los tubos sonoros que aquí nos ocupan. En el aire de un tubo cilíndrico se crea una onda acústica estacionaria cuya longitud de onda queda determinada por las características del tubo. El tubo puede ser abierto (o cerrado) por ambos extremos, o abierto por un extremo y cerrado por el otro. La vibración del aire en un tubo cilíndrico abierto por un extremo consta de un nodo en el extremo cerrado, en el que las moléculas de aire permanecerán quietas y un vientre en el extremo abierto donde el movimiento oscilatorio de las moléculas de aire tendrá amplitud máxima. En el esquema de la figura 1 se muestra el patrón de máximos y mínimos del movimiento de las moléculas de aire para los tres primeros armónicos de la onda estacionaria dentro del tubo. La frecuencia f_1 es la frecuencia más baja que puede escucharse en este tipo de tubo (armónico fundamental), y corresponde a la nota que se ejecuta. La velocidad de propagación del sonido (v) se relaciona con su longitud de onda (λ) y su frecuencia (f) a

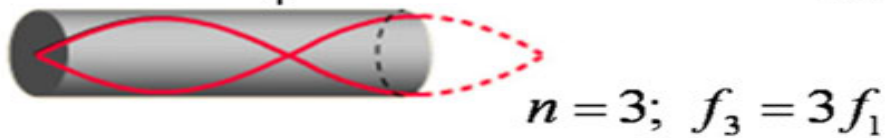
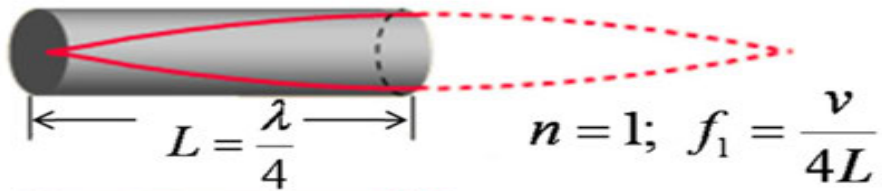
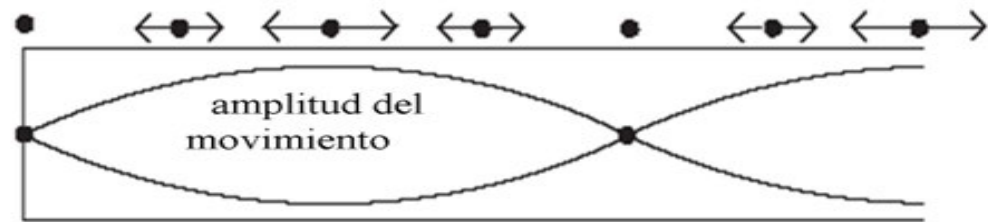
través de la ecuación $f = v/\lambda$. Como en el modo fundamental el tubo, de longitud L , contiene un cuarto de longitud de onda, $\lambda = 4L$, la frecuencia fundamental viene dada por:

$$f_1 = \frac{v}{4L}.$$

Todos los instrumentos musicales cuyo cuerpo sea aproximadamente cilíndrico y se puedan considerar abiertos por un extremo y cerrados por el otro, producirán sonidos formados por esta frecuencia fundamental y todos los armónicos superiores múltiplos impares de esta frecuencia. Por supuesto, para cada longitud del tubo se tendrá una frecuencia fundamental y una serie de armónicos impares diferentes. Es importante recordar que el tono de un sonido está relacionado con la frecuencia fundamental, mientras que las intensidades relativas de los armónicos contribuyen al timbre: la calidad del sonido, aquello que diferencia un mismo sonido producido por dos instrumentos diferentes. La referencia (García-Molina et al. 2009) presenta una revisión cuantitativa de los conceptos básicos sobre el sonido.

Los tubos sonoros o palm pipes Los tubos sonoros son tubos cilíndricos abiertos por ambos lados que emiten sonido al ser percutidos con la palma de la mano en uno de sus extremos. Dado que al golpearlo obstruimos uno de los extremos del tubo, dejando el otro libre, las ondas estacionarias creadas en su interior corresponden a las de un tubo cerrado por un extremo y abierto por el otro. Existen muchas versiones, incluso comerciales, de los tubos sonoros o palm pipes.¹ Desde el punto de vista de la física, se trata de una demostración incorporada al patrimonio docente común y es difícil saber quién la puso por primera vez en circulación. Para realizar una experiencia de contenido puramente físico, las longitudes de los tubos sonoros no tendrían por qué tener unos valores específicos. Pero si queremos que se trate también de una experiencia musical, es necesario que los tubos que fabriquemos tengan unas longitudes determinadas: aquellas que produzcan unas frecuencias fundamentales que coincidan con las de las notas de la escala musical. El sistema de afinación o temperamento musical establece la relación de frecuencias entre las diferentes notas musicales disponibles, así como un valor absoluto de referencia. En la música occidental se utiliza actualmente la escala temperada con 12 semitonos, en la que cada octava se divide en 12 partes que son iguales en una escala logarítmica; como referencia se utiliza la nota La de 440 Hz (Web 1). Según este temperamento, la relación entre las frecuencias de dos semitonos contiguos es de $\sqrt[12]{2}$.

Movimiento de las moléculas del aire (longitudinal)



$$f_n = nf_1, \quad n \text{ impar}$$

Figura 1. Ondas estacionarias generadas en un tubo abierto por el extremo derecho y cerrado por el izquierdo. La línea roja representa la amplitud del movimiento de las moléculas de aire en cada punto del tubo (como se aprecia en la primera figura, ese movimiento es longitudinal).

Para saber qué longitudes deben tener nuestros tubos sonoros, simplemente hay que usar la relación:

$$L_n = \frac{v}{4 f_n} = \frac{343}{4 \sqrt[12]{2^n} f_0} \quad [\text{m}] .$$

(2)

En el numerador de la ecuación (2) aparece la velocidad de propagación del sonido en el medio, v , que se ha tomado como 343 m/s para el aire en condiciones normales. En esta ecuación, n es el número de semitonos por encima (n positivo) o por debajo (n negativo) de la frecuencia $f_0=440$ Hz (nota La4) y la longitud está expresada en metros. Por ejemplo, si queremos producir la nota Do4, cuya frecuencia es de 261,63 Hz ($n = -9$), la longitud del tubo deberá ser de 32,77 cm. En la tabla 1 se incluyen, a modo de referencia rápida, las frecuencias de algunas notas, así como el número n de semitonos respecto a la referencia y la longitud de tubo correspondiente, obtenida mediante la ecuación 2.

Determinación de la velocidad del sonido en aire

Hoy en día hay numerosos programas de ordenador que permiten grabar sonidos a través del micrófono, representar su amplitud en función del tiempo y realizar su análisis espectral (mediante una Transformada de Fourier), que proporciona las frecuencias presentes en el sonido. En este trabajo hemos utilizado el programa Audacity (Web 2), de descarga gratuita. En la figura 2a se muestra un ejemplo de grabación realizada con este programa. La imagen muestra la amplitud de la onda sonora generada al golpear el tubo de longitud $L=163$ mm en función del tiempo, que tiene una forma sinusoidal. La zona iluminada corresponde a 20 períodos, comprendidos en un intervalo temporal de 0,03

Nota	n	Frecuencia, f (Hz)	L_n (m)	Nota	n	Frecuencia, f (Hz)	L_n (m)
Do4	-9	261,63	0,328	Sol4	-2	392,00	0,219
Do#4	-8	277,18	0,309	Sol#4	-1	415,30	0,206
Re4	-7	293,66	0,292	La4	0	440,00	0,195
Re#4	-6	311,13	0,276	La#4	1	466,16	0,184
Mi4	-5	329,63	0,260	Si4	2	493,88	0,174
Fa4	-4	349,23	0,245	Do5	3	523,25	0,164
Fa#4	-3	369,99	0,232	Do#5	4	554,37	0,154

Tabla 1. Relación entre notas, frecuencia y longitud de tubo para la escala temperada con 12 semitonos.

$89 \pm 0,0001$ s. El periodo será por tanto de $1,947 \pm 0,005$ ms, y la frecuencia fundamental correspondiente ($513,61 \pm 0,13$ Hz) se acerca a la de la nota Do5 (véase la tabla 1). En este intervalo puede observarse cómo decae la amplitud del sonido debido al amortiguamiento de las vibraciones de la columna de aire.

Puesto que se cumple la relación (1) entre la frecuencia y la longitud de onda, la velocidad de propagación del sonido en el aire será $v = f\lambda = 513,61 \text{ Hz} \times 0,163 \text{ m} \times 4 = 344,87 \pm 0,06$ m/s. El error de la velocidad se ha calculado teniendo en cuenta los errores del tiempo

medido y de la longitud del tubo (1 mm). Este valor coincide prácticamente con el valor de referencia (343 m/s en aire seco a 20 °C). Este resultado, además de sencillo, ilustra fácilmente la formación de armónicos en un tubo y la relación entre las diversas magnitudes que caracterizan la onda sonora.

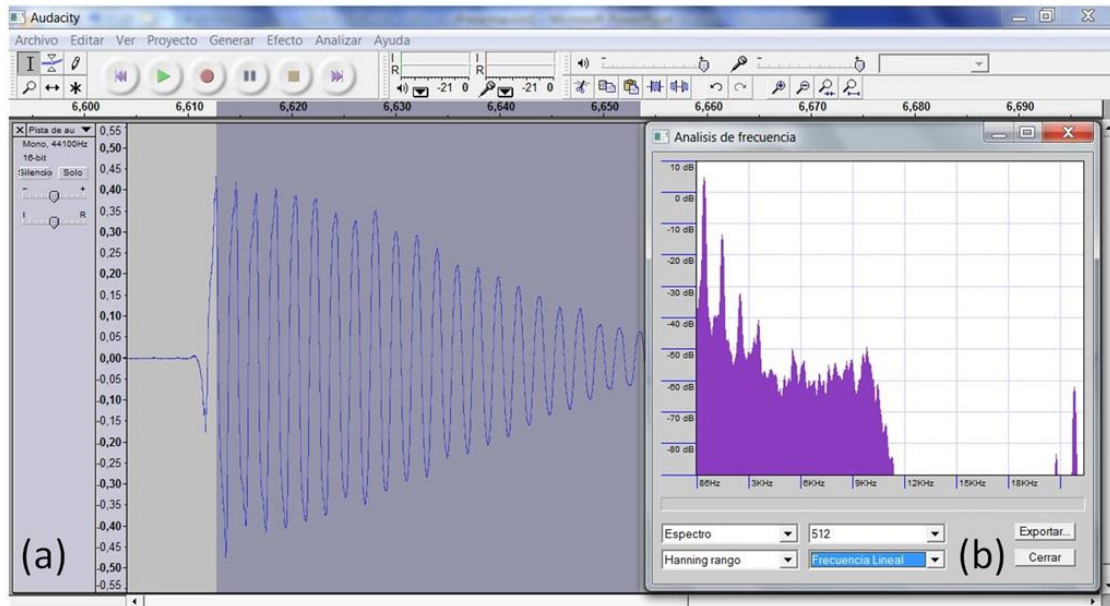


Figura 2. (a) Amplitud del sonido generado al golpear el tubo de longitud $L=163$ mm, en función del tiempo. La selección corresponde a 20 períodos que abarcan un intervalo de tiempo de 0,0389 s. (b) Transformada de Fourier de la onda de la figura (a). Las flechas marcan la posición de los armónicos. Aparecen picos en las frecuencias $f_1=521$ Hz, $f_3=1539$ Hz, $f_5=2548$ Hz y $f_7=3589$ Hz.

Puede obtenerse un análisis más detallado de las características de la onda realizando un análisis de Fourier de la zona iluminada (figura 2b). Se observa claramente que sólo están presentes los armónicos impares, tal y como se espera para un tubo ideal cerrado por un extremo y abierto por el otro. Este comportamiento se pierde en parte a medida que el tubo se va haciendo más largo. En estas condiciones, la longitud de onda es cada vez mayor, mientras que el diámetro del tubo permanece pequeño. Para longitudes de onda mucho mayores que el diámetro del tubo, los armónicos superiores se alejan de la idealidad. En estas condiciones en la serie armónica aparecen también los armónicos pares, aunque con menor intensidad. En los tubos estudiados en este trabajo este fenómeno se aprecia para longitudes mayores de 294 mm (Re4). A partir de las frecuencias obtenidas para la serie armónica se deduce un valor de la velocidad de propagación del sonido en el tubo de $333,17 \pm 0,05$ m/s. El análisis es más completo si se representa la frecuencia fundamental frente a la inversa de la longitud de onda para tubos de diferentes longitudes. Se verifica que la relación es lineal, y en base a la ecuación (1), la

pendiente de la recta que pasa por los puntos experimentales representa la velocidad del sonido en el aire (figura 3).

Para finalizar este apartado quisiéramos comentar que, en realidad, la onda estacionaria que se forma dentro del tubo se comporta como si éste fuera ligeramente más largo, de manera que el vientre no se encuentra exactamente en el extremo abierto, sino un poco más lejos. Si llamamos D_{int} al diámetro interno del tubo, la longitud efectiva del mismo para la onda sonora será aproximadamente $L + 0,3 \times D_{int}$ (Harkleroad 2006, Johnston 2009). Sin embargo, con los tubos utilizados en nuestro experimento no ha sido posible comprobar este efecto. Hemos observado que las variaciones de frecuencia producidas por cambios en la temperatura del aire y la forma de ejecutar los golpes en el tubo son mayores que el efecto debido a esta corrección.

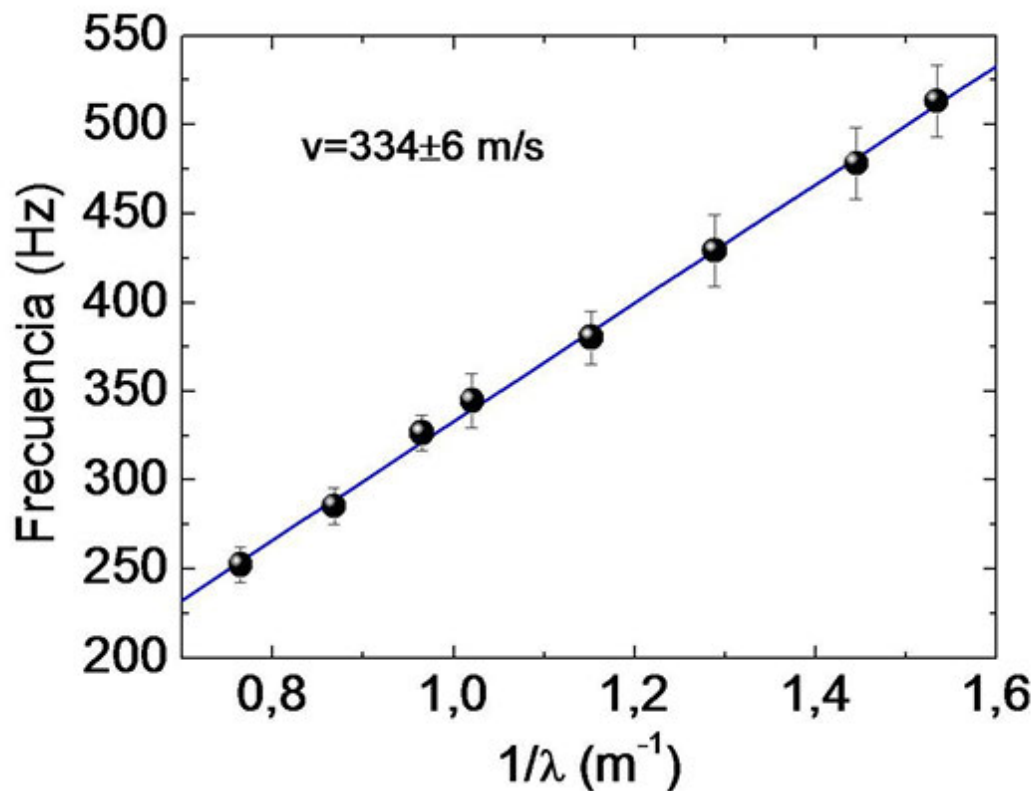


Figura 3. Frecuencia del armónico fundamental en función de la inversa de la longitud de onda ($4L$). La pendiente de la recta corresponde a la velocidad de propagación del sonido en el aire.

Orquesta de tubos sonoros

Los tubos sonoros permiten interpretar piezas musicales en la clase, como una forma de integrar la Física y la Música. Dependiendo de las piezas que se desee interpretar con los tubos sonoros, se pueden fabricar tubos de 8 longitudes diferentes (correspondientes a las notas de la escala, de Do4 a Do5, con $n=-9, -7, -5, -4, -2, 0, 2, 3$, véase la tabla 1) o también se pueden confeccionar tubos con las longitudes correspondientes a los semitonos (un total de 13 tubos de longitudes diferentes, con n recorriendo todos los enteros desde -9 hasta 3). Si el número de personas que va a participar en la interpretación es elevado convendrá, además, hacer varios tubos de cada una de las longitudes. En su fabricación, nosotras hemos utilizado una sierra de calar, lija y tubos de PVC de 2,5 cm de diámetro exterior (2,2 cm de diámetro interior). La pieza que se quiera interpretar puede estar escrita en lenguaje musical (notas en un pentagrama) o bien utilizando el mismo código de colores indicado en los tubos (véase la 397 ANA CROS, CHANTAL FERRER-ROCA FÍSICA POR UN TUBO... figura 4a). La partitura se puede proyectar sobre una pantalla mientras se dirige su ejecución señalando con un puntero las notas que han de tocarse en cada momento. A cada persona que participe en la ejecución se le dará un sólo tubo que deberá golpear repetidamente en su extremo con la palma de la mano



Vous Dirais-Je Maman

W.A.Mozart

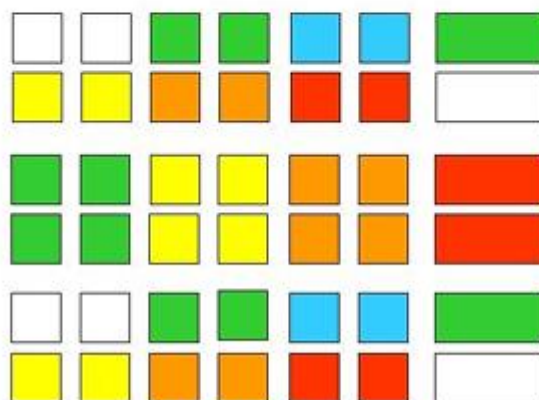


Figura 4. (a) Partitura con código de colores. Para distinguir los tubos de diferente longitud (y por lo tanto frecuencia fundamental), se pueden pegar cintas de diferentes colores o indicar la nota de cada uno de ellos. El código de colores tiene la ventaja de permitir la participación de personas sin conocimientos musicales.