

FUNDAMENTOS PARA UNA PROPUESTA INNOVADORA DE LA PRÁCTICA DE LABORATORIO 'ESTUDIO DE PÉNDULO SIMPLE' USANDO LAS POSIBILIDADES DEL SISTEMA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIOS ASISTIDAS POR COMPUTADORAS HPCI-1

FUNDAMENTS FOR AN INNOVATIVE PROPOSAL OF THE SIMPLE PENDULUM LAB USING THE POSSIBILITIES OF THE COMPUTER AIDED PHYSICS LAB SYSTEM HPCI-1

A. HERNÁNDEZ[†]

Departamento de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cienfuegos, Cuba. archdez@ucf.edu.cu [†]

[†] autor para la correspondencia

Recibido 9/09/2021; Aceptado 10/06/2022

Empleando un experimento del sistema de prácticas de laboratorio asistido por computadoras HPCI-1 se obtuvieron los valores de la aceleración gravitatoria para tres péndulos reales con lentejas de masas diferentes en oscilaciones pequeñas. También se midieron los tiempos en que cada péndulo reducía su amplitud en 30 y cuál era su amplitud al cabo de 30 períodos, partiendo en ambos casos desde 50 de amplitud inicial. Los resultados se obtuvieron en menos de 2 horas y constituyen el fundamento para una propuesta innovadora para la práctica de laboratorio relativa a este sistema físico. Mediante un grupo de preguntas que promuevan el análisis de dichos resultados los estudiantes universitarios podrán profundizar en las características de este sistema y rebasar el nivel de análisis respecto al nivel precedente, comprenderán cuál de los péndulos difiere más del modelo armónico y cómo esto se refleja en los resultados de los valores de la aceleración gravitatoria.

Using one experiment of the Computer Aided Physics Laboratory System HPCI-1 experimental values of the gravitational acceleration for three real pendulums with bobs of different masses in small oscillations were obtained. Elapsed times for the reduction of oscillation amplitudes in 30 and oscillation amplitude after 30 periods, both starting from initial amplitude of 50 were also measured. The results were obtained in less than 2 hours and they are the fundament of an innovative proposal for the lab practice dedicated to this physical system. Through some suggesting questions that promote the analysis of results the university students can to deep in the main characteristics of this system and overload the analysis level respect the previous educational level, they will understand which of the three pendulums differs more from the harmonic model and how this is expressed in the results for the gravitational acceleration.

PACS: Teaching methods and strategies (Métodos y estrategias de enseñanza), 01.40.gb; Laboratory computer use (Uso de computadores en el laboratorio), 01.50.Lc; Data acquisition (Adquisición de datos), 07.05.Fb; Laboratory experiments and apparatus (Aparatos y experimentos de laboratorio), 01.50.Pa.

I. INTRODUCCIÓN

El uso de los sistemas de prácticas de laboratorios asistidos por computadoras (SPLAC) introdujo una significativa simplificación de todo el proceso de realización de las mediciones y su procesamiento y como regla general ha aumentado la exactitud y precisión de las mediciones.

En los SPLAC los sensores de medición se intercalan en los montajes experimentales para efectuar las mediciones de las magnitudes físicas necesarias, se conectan a la computadora a través de una interfaz que realiza la adecuación de la señal proveniente del sensor. Finalmente se ejecuta un programa en la computadora que guía el proceso de efectuar las mediciones, las procesa y presenta los resultados en la forma conveniente. Todo esto está debidamente integrado en el sistema.

Sin embargo, en la mayoría de los casos las prácticas de laboratorio de los SPLAC no han modificado su estructura para atemperarlas a las nuevas condiciones. Dichas prácticas de laboratorio no siempre se han empleado de

la forma más eficiente en cuanto a sus posibilidades. Los fabricantes se han centrado en las facilidades tecnológicas para mostrar resultados con precisión y exactitud, pero han descuidado muchos elementos didácticos (tal vez a ellos no les corresponde esta tarea). En muchísimos de los trabajos planteados se reduce el papel del estudiante a seguir una serie de pasos (que tanto criticamos en calidad de recetas), pero que ni siquiera implican el proceso de efectuar las mediciones y de cómo se involucra el estudiante como experimentador. Como resultado de ello, lo que se ha conseguido es acomodar a los estudiantes que siguen una rutina de pasos (a lo que se ha reducido el proceso de medición) y que cuando analizan los resultados llegan a las mismas conclusiones que cuando la práctica se hacía de forma más manual y reiteran los mismos niveles de conocimiento que en el nivel de enseñanza anterior. No hay una ganancia en el razonamiento, no se aprovechan las ventajas del aumento de la exactitud y la precisión de las mediciones, del proceso de simplificación de las mediciones con menor intervención del hombre, con menos margen para las fuentes de errores y del procesamiento de los datos con los software asociados, para ir más allá, para profundizar en

otros aspectos del fenómeno estudiado.

Desafortunadamente se usa esta tecnología para arribar a las mismas conclusiones que se pueden llegar con otras variantes y repite los niveles a que se analizan los fenómenos en el nivel de enseñanza anterior. Pensamos que es hora de que esta tecnología se emplee en revelar los nuevos aspectos de los fenómenos cuando estos se pueden estudiar con nuevos elementos matemáticos en la Educación Superior (cálculo diferencial e integral, ecuaciones diferenciales, p.ej.) y entonces, se justifica usar las potencialidades de estos sistemas para revelar estos nuevos elementos y de esta manera avanzar en el nivel de asimilación y comprensión de los fenómenos respecto al nivel anterior.

Tomemos como referencia la práctica de laboratorio relativa al movimiento armónico ejecutado por el péndulo simple. Para este sistema la condición armónica se logra en ausencia de fricción y con oscilaciones pequeñas (aquellas para las cuales $\sin\theta \approx \theta$). Bajo estas suposiciones la ecuación diferencial es:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{g}{L}\theta = 0 \quad (1)$$

cuya solución es:

$$\theta(t) = \theta_{max}\cos(\omega t + \varphi_0) \quad (2)$$

donde $\omega^2 = \frac{4\pi^2}{T^2} = \frac{g}{L}$ y de aquí

$$L = \frac{g}{\omega^2} \quad (3)$$

$$T^2 = \left(\frac{4\pi^2}{g}\right)L \quad (4)$$

Como se ve, el período de las oscilaciones sólo depende de la raíz cuadrada de la longitud del péndulo y la amplitud de las oscilaciones se mantiene en el tiempo. Desde el nivel medio se plantea la verificación experimental de la expresión que establece que el cuadrado del período del péndulo es directamente proporcional a la longitud del mismo, la cual se aprovecha para determinar experimentalmente el valor de la aceleración gravitatoria local. Precisamente el experimento 14 de la sección de Mecánica del HPCI-1 (Fig. 1) tiene ese propósito.

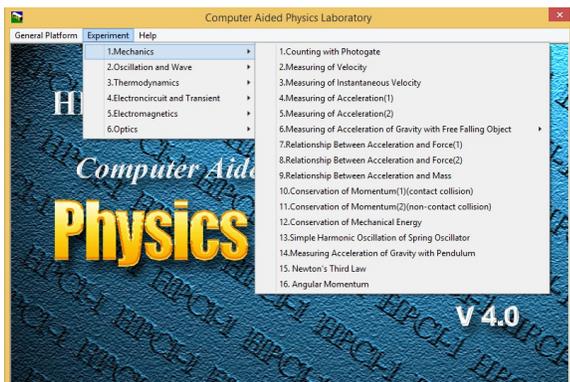


Figura 1. Aspecto de la pantalla del menú principal del software del SPLAC HPCI-1 mostrando los experimentos del capítulo 1 donde aparece el 14 que fue usado en el presente trabajo.

Recientemente Ceballos-Izquierdo et al. [?] investigaron el bórido de Viñales y estimaron la trayectoria (Fig. 1) como una alternativa a Zuluaga et al. [?], por lo que dicho evento no se incluye en el siguiente listado.

Este trabajo de laboratorio propuesto con el uso del HPCI-1 por los fabricantes es muy sencillo y poco aporta de nuevo al estudiante universitario porque está dedicado a reiterar los mismos resultados de la enseñanza media.

El objetivo del presente trabajo es ilustrar las posibilidades existentes en el sistema HPCI-1 adquirido por el MES para la mayoría de las universidades cubanas tomando como caso de estudio las oscilaciones pequeñas de un péndulo simple real cuando hay presencia de fuerza de fricción viscosa del cuerpo que oscila con el aire. Para ello hacemos uso del software asociado al experimento anteriormente mencionado y realizamos el experimento para tres péndulos con lentejas esféricas de igual radio, pero que difieren en su masa. Al procesar la información que brinda dicho software y la de algunos experimentos simples complementarios podemos formularle al estudiante un grupo de preguntas que lo conduzcan a extraer conclusiones importantes acerca de las características reales de este movimiento oscilatorio que no se abordaron antes y que lo describen con mayor rigor.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Dados los objetivos propuestos, el trabajo está concebido a partir del uso del sistema asistido por computadoras HPCI-1 adquirido por el Ministerio de Educación Superior de Cuba para las universidades y complementado por un cronómetro del laboratorio. Se realizó un análisis profundo de las posibilidades del sistema a partir del estudio de los manuales que lo acompañaban [1,2] y de la realización de los trabajos conforme a los mismos.

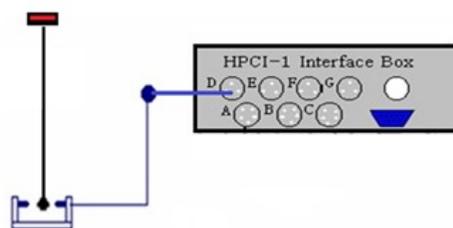


Figura 2. Esquema del montaje y soporte usado.

Se empleó el montaje con los accesorios del experimento 14 'Midiendo la aceleración gravitatoria con el péndulo' de la sección de Mecánica (Fig. 1).

En la Fig. 2 aparece un esquema de éste y el soporte donde se colocaba el péndulo, el cual tenía la posibilidad de nivelación con tres tornillos en sus patas para garantizar el movimiento de oscilación de la esfera en un plano. Variando la distancia desde donde se colgaba el péndulo se obtenían diferentes valores de su longitud. La esfera oscilaba siempre a la misma altura y en el centro entre el emisor y el receptor de una foto compuerta tipo B.

Ejecutando el software asociado con este trabajo se pudieron obtener los valores del período de 10 oscilaciones para 6 longitudes distintas del péndulo, sus promedios y la gráfica de ajuste del ploteo de los promedios del período al cuadrado contra las longitudes del péndulo. La exactitud en las mediciones de tiempo con la interfaz era de 0,001 s y la de la longitud del péndulo era de 0,001m.

El software del sistema HPCI-1 asociado con este trabajo construye y ajusta la gráfica de T^2 contra L , y brinda el valor de la pendiente que corresponde al cociente de $(4\pi^2/g)$. Es preferible construir las gráficas de L contra el inverso de ω^2 de forma que las pendientes de estas relaciones lineales nos brinden directamente el valor de la aceleración gravitatoria g . Empleando EXCEL de Microsoft se construyeron las gráficas y se ajustaron por el método de los mínimos cuadrados. De aquí se obtuvieron las ecuaciones de las rectas de ajuste (de ellas los valores de la pendiente m y el intercepto b) y el parámetro R^2 que nos indicaba el grado de linealidad. A su vez, se calcularon las incertidumbres Δm en la pendiente y Δb en el intercepto de los parámetros de la recta de ajuste de acuerdo con las expresiones:

$$\Delta m = S_y \sqrt{\frac{N}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)^2}} \quad (5)$$

$$\Delta b = S_y \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)^2}} \quad (6)$$

Donde S_y viene dada por:

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - mx_i - b)^2}{N - 2}} \quad (7)$$

Con el propósito de hacer un estudio más general de las oscilaciones del péndulo en condiciones reales se planteó obtener los resultados para 10 oscilaciones y 6 longitudes, pero usando tres péndulos con esferas de igual diámetro (19 mm), pero que diferían en sus masas porque estaban hechas de materiales diferentes, a saber, acero (26,9 g), aluminio (9,8 g) y madera (2,4 g). El procesamiento se haría de forma similar para comparar los resultados tomando como base los valores obtenidos para la aceleración gravitatoria.

Con vistas a evidenciar que las oscilaciones en estos casos no eran armónicas se midió con un cronómetro de precisión

0,1 s el tiempo en que se atenuaban las amplitudes angulares de las oscilaciones desde el valor inicial de 5° hasta 2° y de la amplitud angular de las oscilaciones de los tres péndulos al cabo de un tiempo igual a 30 períodos partiendo de una amplitud angular inicial de 5° . En ambos casos se empleó un péndulo de longitud 1 m.

Para el cálculo del valor de la aceleración gravitatoria local para la latitud λ de la ciudad de Cienfuegos al nivel del mar se empleó la ecuación recomendada por la Organización Internacional de Metrología Legal en el boletín OIML 127 [3] con una exactitud del 0,01%. Esta ecuación utiliza los coeficientes adoptados por la Asociación Internacional de Geodesia (AIG) en el GRS80 (Geodetic Referential System of 1980) [4]

$$g = 9.780318(1 + 0.0053024 \sin^2 \lambda - 0.0000059 \sin^2 2\lambda) [m/s^2] \quad (8)$$

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se muestran los resultados de las mediciones del tiempo en que se atenuaban las amplitudes angulares de las oscilaciones desde el valor inicial de 5° hasta 2° y de la amplitud angular de las oscilaciones de los tres péndulos al cabo de un tiempo igual a 30 períodos.

Tabla 1. Parámetros para evidenciar la atenuación de las oscilaciones de los péndulos de diferentes masas.

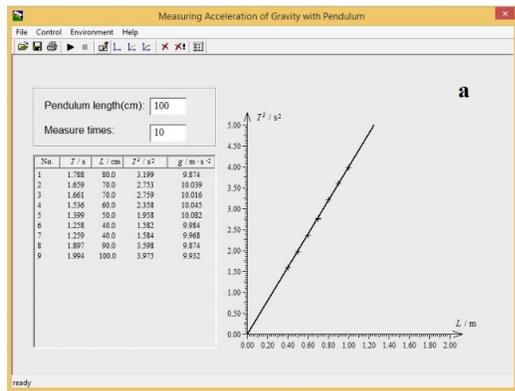
Material de la esfera	Masa, g	Tiempo desde 5° a 2°	Amplitud luego de 30 períodos
Acero	26.9	306.8 s	4.0°
Aluminio	9.8	71.4 s	3.0°
Madera	2.4	51.3 s	1.9°

De ambos resultados se puede concluir que de los tres péndulos empleados el que posee mayor masa tiene un comportamiento más cercano al movimiento armónico puesto que sus amplitudes decrecen más lentamente con el tiempo. Es por eso que los valores de la aceleración gravitatoria calculados bajo la hipótesis de que es armónico para este péndulo se deben corresponder mejor con el valor de referencia calculado según (8).

Para los otros dos péndulos los efectos de la fuerza de fricción se hacen más notables, por ende, se alejan más de la condición de armónico y por tanto los resultados obtenidos bajo este supuesto deben tener menos correspondencia con el valor de referencia.

Por otra parte, la Fig. 3 presenta el aspecto de los datos de las corridas para los tres péndulos con esferas de diferentes materiales y masas ofrecidos por el sistema HPCI-1 para el trabajo ejecutado. De aquí se podían obtener los datos para procesarlos de la otra manera descrita empleando EXCEL.

El sistema también brindaba las gráficas ajustadas con los valores de las pendientes. Estas se muestran en las Fig. 3 (a) y 4 para las esferas de acero, aluminio y madera respectivamente.



Acceleration of Gravity with Pendulum

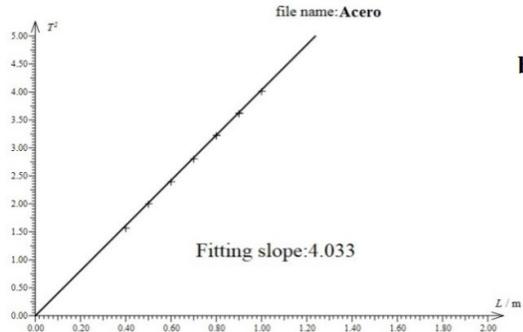


Figura 3. (a) Aspecto de los datos de las corridas ofrecidos por el sistema HPCI-1. (b) Gráfica ajustada T^2 contra L con el valor de la pendiente para el péndulo con esferas de acero

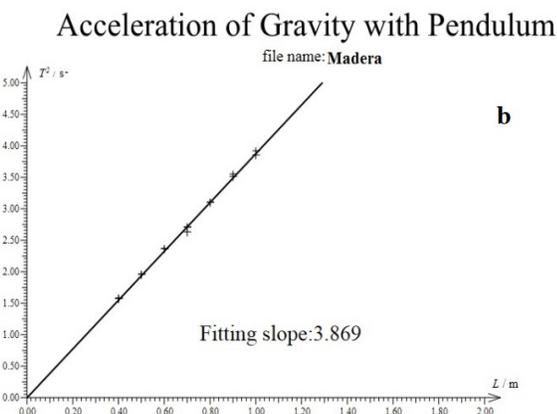
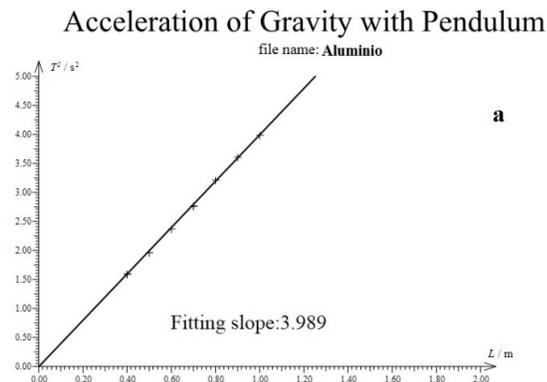


Figura 4. Gráficas ajustadas T^2 contra L con los valores de las pendientes para los péndulos con esferas de aluminio (a) y de madera (b)

En la Fig. 5 aparece una gráfica que contiene el procesamiento para los tres péndulos de la relación L contra el inverso de ω^2 y

en la que aparecen las ecuaciones de ajuste con sus parámetros y el coeficiente R^2 . Los valores de la pendiente corresponden a la aceleración gravitatoria. Los resultados aparecen resumidos en la Tabla 3.

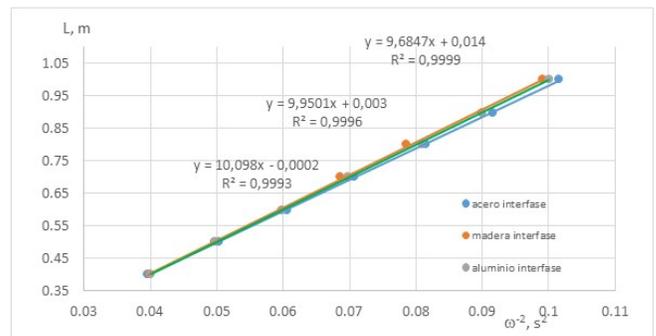


Figura 5. Gráficas ajustadas de L contra el inverso de ω^2 con los valores de la pendiente para los tres péndulos con esferas de diferentes masas.

Se realizó el cálculo de la aceleración gravitatoria de acuerdo con la expresión (8) tomando la latitud de Cienfuegos ($22,14960^\circ$) y su ubicación al nivel del mar y se obtuvo el valor $g = 9,78766 \pm 0,00098 \text{ m/s}^2$. Este valor se empleó como referencia para el cálculo de la incertidumbre absoluta para el experimento y para calcular las incertidumbres relativas de los valores de la aceleración gravitatoria obtenida para cada péndulo.

La expresión de la incertidumbre relativa de la aceleración gravitatoria en términos de las incertidumbres presentes en la medición de la longitud del péndulo y el período de sus oscilaciones se obtuvo de la propagación de las incertidumbres que nos condujo a:

$$\frac{\Delta g}{g} = 2 \frac{\Delta T}{T} + \frac{\Delta L}{L} \quad (9)$$

En la Tabla 2 aparece la incertidumbre calculada usando la longitud máxima de 1 m, el período correspondiente de 2 s y el valor de referencia de $g=9,78 \text{ m/s}^2$.

Tabla 2. Exactitud de los instrumentos de medición e incertidumbre del valor de la aceleración gravitatoria

Instrumento de Medición	$\Delta T, \text{ s}$	$\Delta L, \text{ m}$	$2 \frac{\Delta T}{T} + \frac{\Delta L}{L}$	$\Delta g, \text{ m/s}^2$
Sistema HPCI-1	0.001	0.001	0.002	0.02

Como se puede observar de los resultados expuestos en la Tabla 3 el valor experimental más cercano al valor de referencia calculado según la ecuación (8) se obtuvo para el péndulo con la esfera de acero, que era la más pesada.

A continuación, le sigue el valor obtenido para el péndulo con esfera de aluminio y por último la del péndulo con esfera de madera. En ese mismo orden se ubican los coeficientes R^2 que indican una mayor linealidad de la gráfica de los elementos que se plotean en la misma. Con los valores obtenidos las incertidumbres relativas tomando como referencia el valor calculado usando (8) fueron 1,0%, 1,7% y 3,2%. Las incertidumbres en las pendientes y los interceptos de las ecuaciones de ajuste por mínimos cuadrados también

muestran la misma regularidad de reducirse con el aumento de la masa.

Una vez que los resultados experimentales han brindado la evidencia suficiente para convencernos de que se trata de un movimiento infra amortiguado, debemos emplear la descripción matemática correcta. Introduciendo el término de la fricción viscosa del tipo $f = -bv$ en la ecuación diferencial que describe las oscilaciones pequeñas del péndulo tenemos:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{b}{m} \frac{d\theta}{dt} + \frac{g}{L}\theta = 0 \quad (10)$$

La solución de la misma tiene la forma:

$$\theta(t) = \theta_{max} e^{-\frac{b}{2m}t} \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (11)$$

que corresponde al caso infra amortiguado y que describe cómo decrecen las amplitudes de las oscilaciones con el tiempo. La expresión de la frecuencia angular de las oscilaciones viene dada por:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{L} - \frac{b^2}{4m^2}} \quad (12)$$

Si denotamos por ω_0 a la frecuencia angular correspondiente al caso armónico (g/L) y γ al cociente $b/2m$, la razón de las frecuencias angulares del caso infra amortiguado al caso armónico se puede escribir como:

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \sqrt{1 - \left(\frac{\gamma}{\omega_0}\right)^2} \quad (13)$$

Los valores del término $b/2m$, que determina los efectos de la fricción en la amplitud y frecuencia de las oscilaciones, para las tres esferas son pequeños y sus cuadrados son aún menores.

Es por ello que los efectos en el corrimiento de la frecuencia angular, que podrían dar lugar a un cambio en el período de las oscilaciones, no son notables y sí el decaimiento de las amplitudes ya que dicho término se encuentra en el exponente de una función exponencial decreciente que es una función de rápida variación. En la Tabla 4 se han resumido los cálculos teóricos que conllevan a ilustrar lo antes señalado. Aquí se empleó el valor de la viscosidad relativa del aire a temperatura ambiente $\eta = 1,83 \cdot 10^{-5}$ Pa·s para hallar b y la relación (13) con $\omega_0 = 9,78 \text{ s}^{-2}$ para la razón entre las frecuencias de los casos infra amortiguado y armónico.

Se aprecia claramente de la razón ω/ω_0 que el corrimiento en la frecuencia angular (y por tanto en el período de las oscilaciones) no debe ser apreciable, lo cual se pudo verificar experimentalmente al observar los registros brindados por el HPCI-1 para cada una de los péndulos y cada una de las longitudes que se muestra en la Tabla 5.

Sin embargo, los valores de la columna correspondiente a $e^{-(b/2m)t}$ para 60 s reflejan que la amplitud de las oscilaciones

del péndulo con la esfera de acero (de mayor masa) apenas se debe reducir en 0,007 (un 0,7%) al cabo de 60s (unos 30 períodos), mientras que para el péndulo con esfera de aluminio se reduce en 0,02 (un 2%) y en 0,08 (un 8%) para la de madera.

Los valores experimentales mostrados en la Tabla 1 resultan muy superiores, pero concuerdan al establecer el orden creciente de la atenuación al pasar del acero a la madera. En un trabajo futuro determinaremos experimentalmente el coeficiente de amortiguamiento de estas esferas al moverse en el aire.

Gracias a las facilidades del sistema asistido por computadoras HPCI-1 las mediciones para los tres péndulos de diferentes masas se pueden realizar en un tiempo que se enmarca en el de una práctica de laboratorio. Esta circunstancia nos motiva a proponer un diseño para la misma en que se realicen las mediciones para tres péndulos de diferentes masas, se procesen con las facilidades del propio sistema y de conjunto con las observaciones de la amplitud en el tiempo los ponga en condiciones de responder a un grupo de preguntas que requieran del análisis de sus resultados.

En esas preguntas debemos insistir en los aspectos más relevantes de las oscilaciones y rebasar en profundidad los conocimientos del nivel medio superior que se restringe al caso estrictamente armónico. Como se observa se pueden introducir consideraciones relativas a la presencia de la fuerza de fricción y su influencia en las características principales del movimiento y familiarizar a los estudiantes con las ecuaciones del caso amortiguado.

De las expresiones (3) y (12) se pueden obtener las expresiones para la aceleración gravitatoria en el caso armónico e infra amortiguado:

$$g = \omega^2 L \quad (14)$$

$$g = \left(\omega^2 + \frac{b^2}{4m^2}\right)L \quad (15)$$

Aquí se puede apreciar que los resultados obtenidos para la aceleración gravitatoria del péndulo para el cual el término $b/2m$ sea menor debe corresponderse mejor con la obtenida para el caso armónico. A esta conclusión se puede llegar al observar los resultados obtenidos para los tres péndulos que difieren en su masa y que se mostraron en la Tabla 3.

Algunas preguntas para profundizar en los resultados experimentales obtenidos y sus posibles causas podrían ser:

¿Las oscilaciones de los tres péndulos estudiados son armónicas? ¿Cuáles de las características principales de las oscilaciones armónicas no se observan en sus resultados?

¿Qué tipo de oscilaciones exhiben los tres péndulos? ¿Qué resultados de los obtenidos por usted le permiten hacer esa afirmación?

Tabla 3. Valores experimentales de la aceleración gravitatoria y sus incertidumbres relativas, coeficientes R^2 y las incertidumbres de la pendiente y el intercepto en las ecuaciones de ajuste en dependencia de la masa de la lenteja de los péndulos

Material de la esfera	Masa, g	Pendiente m (valor de g), m/s^2	Coefficiente R^2	$\Delta g/g\%$	Δm	Δb
Acero	26.9	9.68 ± 0.02	0.9999	1.0	0.028	0.0017
Aluminio	9.8	9.95 ± 0.02	0.9996	1.7	0.037	0.0023
Madera	2.4	10.01 ± 0.02	0.9993	3.2	0.071	0.0042

Tabla 4. Cálculos teóricos del coeficiente de amortiguamiento $b/2m$, de ω/ω_0 y $e^{-(b/2m)t}$ para 60 s

Material de la esfera	Radio, m	$b = 6\pi\eta r$, Pa·s	Masa, kg	$\frac{b}{2m}$, s^{-1}	$(\frac{b}{2m})^2$	ω/ω_0	$e^{-(b/2m)t}$ para 60 s
Acero	$9.5 \cdot 10^{-3}$	$6.55 \cdot 10^{-6}$	$1.22 \cdot 10^{-2}$	$1.52188 \cdot 10^{-4}$	$1.52188 \cdot 10^{-9}$	0.999999999	0.992706726
Aluminio	$9.5 \cdot 10^{-3}$	$6.55 \cdot 10^{-6}$	$9.80 \cdot 10^{-3}$	$3.34 \cdot 10^{-4}$	$1.14065 \cdot 10^{-8}$	0.999999994	0.980159466
Madera	$9.5 \cdot 10^{-3}$	$6.55 \cdot 10^{-6}$	$2.40 \cdot 10^{-3}$	$1.36 \cdot 10^{-3}$	$1.89121 \cdot 10^{-7}$	0.999999905	0.921640541

Tabla 5. Períodos de las oscilaciones de los tres péndulos para diferentes longitudes

L, m	Período T para acero, s	Período T para aluminio, s	Período T para madera, s
1.0	1.978	1.987	1.994
0.9	1.884	1.884	1.897
0.8	1.761	1.788	1.788
0.7	1.645	1.661	1.661
0.6	1.536	1.536	1.536
0.5	1.400	1.399	1.399
0.4	1.255	1.259	1.259

Comparando las expresiones (14) y (15) para la aceleración gravitatoria obtenidas para los casos armónicos e infra amortiguado ¿cómo deben ser los valores de la aceleración gravitatoria obtenida para los tres péndulos respecto al caso armónico? ¿cuál mayor, cuál menor? ¿se corresponde esto con sus resultados experimentales?

De las características del movimiento oscilatorio amplitud y frecuencia ¿cuál se afecta más con la presencia de la acción de la fricción viscosa con el aire? ¿puede explicarlo a partir de las ecuaciones del movimiento amortiguado?

IV. CONCLUSIONES

Las facilidades del sistema de prácticas de laboratorio asistidos por computadoras HPCI-1 permiten aumentar el número de tareas a realizar por el estudiante dentro del horario de una práctica de laboratorio.

Estas tareas deben diseñarse por el profesor de manera que incluya la modificación de algún parámetro o condiciones experimentales que provoquen un cambio y acorde con esto, debe formular un conjunto de interrogantes a responder a partir del análisis de sus resultados.

Debe prestarse cuidado de no repetir resultados conocidos

del nivel precedente, sino avanzar en el nivel de profundidad de los conocimientos a partir de los nuevos conocimientos y habilidades propios del nivel superior.

El sistema HPCI-1, permite realizar el estudio del movimiento del péndulo simple ejecutando oscilaciones pequeñas cuando existe presencia de fuerza de fricción del cuerpo con el aire cuando el movimiento ya no es armónico simple, sino infra amortiguado.

Respecto al movimiento armónico simple, la característica del movimiento amortiguado que más difiere es la amplitud de las oscilaciones y no su frecuencia angular.

REFERENCIAS

- [1] HPCI-1 Computer Aided Physics Laboratory. Experiment Manual. Version 4.0. U-Star Sensor Technology Co., Ltd.
- [2] HPCI-1 Computer Aided Physics Laboratory. Application Manual. Version 4.0. U-Star Sensor Technology Co., Ltd.
- [3] A. Thulin, A "standardized" gravity formula Bulletin OIML N0 129, June 1992.
- [4] H. Moritz, Bull. Géodésique 62, 348 (1988).

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) license.

