

Automatización de actividades experimentales con Arduino en la formación de profesores de Física

EDVCATIO PHYSICORVM



QVO NON ASCENDAM?

ISSN 1870-9095

Segifredo Luis González Bello¹, Yerall Romero Mariño¹, Ramón Rubén González Nápoles¹

¹Departamento de Matemática-Física, Universidad de Ciencias Pedagógicas “Enrique José Varona”, Calle 108 No. 29F08 e/ 29E y 29F. Ciudad Escolar Libertad, Marianao C.P. 11400, La Habana

E-mail: segifredogonzalezb@gmail.com

(Recibido el 19 de abril de 2024, aceptado el 25 de agosto de 2024)

Resumen

En trabajos precedentes sobre el uso de *Arduino*, se revela insuficiente desarrollo didáctico en la automatización de actividades experimentales, en la formación de profesores. Este estudio tuvo como objetivo, la automatización de la medición de la aceleración de la gravedad g con un péndulo simple y *Arduino*. Se utilizó una metodología experimental con enfoque interpretativo, midiendo el periodo de un péndulo (T), para cinco longitudes diferentes (L), con un sensor ultrasónico HC-SR04 y un microcontrolador *Arduino* UNO R3. Se obtuvo el periodo del péndulo diseñado y el cálculo de g en La Habana (Ciudad Escolar Libertad), comparándolo con el reportado por el Instituto Nacional de Metrología. En otro resultado se construyó la gráfica de T^2 Vs L , y se calculó el valor de g . El estudio realizado introdujo innovación didáctica a un diseño experimental tradicional, al emplear la automatización de actividades experimentales con el microcontrolador *Arduino*.

Palabras clave: Enseñanza de la Física, Formación de profesores de Física, Actividades experimentales de Física.

Abstract

In previous works on the use of *Arduino*, insufficient didactic development is revealed in the automation of experimental activities, in teacher training. This study aimed automation of measurement the acceleration of gravity g with a simple pendulum and *Arduino*. An experimental methodology with an interpretative approach was used, measuring the period (T) of a pendulum, for five different lengths (L), with sensor HC-SR04 and an *Arduino* microcontroller. The period of the designed pendulum and the calculation of g in Havana (Ciudad Escolar Libertad) were obtained, comparing it with that reported by the National Metrology Institute. In another result, the graph T^2 Vs L was constructed and the value of g was calculate. The study carried out introduced didactic innovation to a traditional experimental design, by using the automation of experimental activities with the *Arduino* microcontroller. Revisar cuidadosamente la redacción del resumen en inglés.

Keywords: Physics education, Physics teacher training, Physics laboratory experiments.

I. INTRODUCCIÓN

Los estudios realizados con un péndulo simple han influenciado el desarrollo conceptual de los problemas oscilatorios de la mecánica, que tienen una connotación didáctica en los programas curriculares, al acercar a los estudiantes a la obra científica de algunos precursores de la física clásica: Galileo, Huygens, Newton y Hooke, entre otros [1].

En el programa de Mecánica para la formación de profesores de Física, se incluye el tema: Oscilaciones y Ondas mecánicas, que tiene entre sus objetivos la aplicación del concepto movimiento armónico simple (MAS), al estudio del periodo de las oscilaciones de un péndulo simple con ayuda de una computadora [2].

Como bibliografía básica, el programa recomienda los textos de Resnick, Halliday y Krane [3] y Young y Freedman [4]. Ambos incluyen en las aplicaciones del MAS el péndulo simple, y en [3] se reconoce que un método práctico para

medir la aceleración de la gravedad g localmente, es con el uso de él.

Fueron consultados reportes de actividades experimentales tradicionales para la medición de g [5,6], la precisión del sensor de un teléfono inteligente para calcular g [7], la grabación del movimiento de un péndulo con teléfono inteligente y su análisis con *Tracker* [8], experimentos desarrollados en el *Manual for Intelligent Digital Experiment System* (IDES) [9], para medir g con un péndulo, y un experimento del sistema de prácticas de laboratorio asistido por computadoras HPCI-1 [10], para el estudio del péndulo simple.

En estos trabajos se exponen variantes para desarrollar experimentos relacionados con el péndulo, desde los tradicionales hasta los más recientes que incluyen el uso de recursos tecnológicos, pero se aprecia en ellos un uso limitado de la automatización de las actividades experimentales.

En trabajos precedentes sobre el uso de plataformas

robóticas con *Arduino* [11, 12], se refiere que han sido utilizadas como apoyo tecnológico para favorecer el aprendizaje de los estudiantes, pero se revela insuficiente desarrollo didáctico en la automatización de actividades experimentales, en la formación de profesores [13].

El Proyecto de Investigación No Asociado a Programa NA223LH508-28 “Actualización de la formación integral del profesor de Física y la educación energética en la sociedad contemporánea”, que se desarrolla en la carrera Licenciatura en Educación con perfil en Física, de la Universidad de Ciencias Pedagógicas “Enrique José Varona”, de La Habana, tiene un objetivo relacionado con la automatización de actividades experimentales con robótica educativa, privilegiando el uso de *Arduino*.

El estudio realizado tuvo como objetivo la automatización de una actividad experimental para la medición del valor local de la aceleración de la gravedad g , con un péndulo simple y *Arduino*.

II. MÉTODOS Y MATERIALES

Se utilizó una metodología experimental con enfoque interpretativo, basada en las mediciones del periodo de oscilación de un péndulo (T), para cinco longitudes diferentes (L), con un sensor ultrasónico HC-SR04 acoplado a un microcontrolador *Arduino* UNO R3.

Desde el punto de vista didáctico se debe tener en cuenta que el péndulo simple es una masa puntual m suspendida de un hilo ligero inextensible de longitud L [3, 4]. Su movimiento es aproximadamente armónico simple si la amplitud es pequeña, y está caracterizado por los parámetros: oscilación completa o ciclo, amplitud, periodo y frecuencia, definidos con precisión en [3, 4].

Fuera de su posición de equilibrio, el hilo forma un ángulo θ con la vertical. Considerando la Tierra como un sistema de referencia inercial, las fuerzas que actúan sobre la masa son la fuerza gravitatoria (mg) y la tensión (T) del hilo como se apunta en [3]. En la FIGURA 1 se muestra un diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan sobre la masa m que oscila.

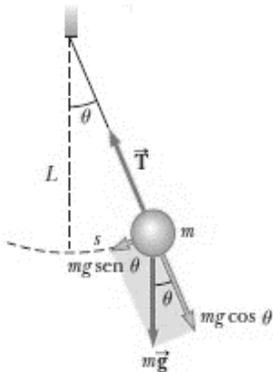


FIGURA 1. Se muestra un diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan sobre la masa m que oscila, donde g es el valor de la aceleración de la gravedad y L la longitud del hilo. Fuente: Péndulo simple. <https://termfisicaun.weebly.com>

Si el ángulo θ es pequeño, la fuerza restauradora del movimiento debida a la gravedad, es proporcional al desplazamiento y actúa en dirección opuesta a él, lo que constituye el fundamento básico del

El periodo de oscilación del péndulo simple para pequeñas amplitudes se obtiene en [3, 4]:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}. \quad (1)$$

De la ecuación (1) se infiere que el periodo del péndulo simple no depende de la masa ni de la amplitud de la oscilación. Para determinar la gravedad g utilizando un péndulo simple, se debe conocer el periodo de oscilación (T) y la longitud del hilo (L).

Siguiendo la secuencia didáctica mostrada en [8], a partir de la ecuación (1) se obtiene una relación lineal entre el cuadrado del periodo de oscilación T^2 y la longitud del péndulo L , dada por la ecuación:

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

Despejando g en la ecuación (2), se obtiene que:

$$g = \left(\frac{4\pi^2}{T^2}\right)L. \quad (3)$$

La ecuación (2) se puede graficar si se tienen los valores de T y L , medidos experimentalmente. Se obtiene una recta de pendiente p , que permite calcular el valor de g , mediante la ecuación de trabajo:

$$g = \frac{4\pi^2}{p} \quad (4), \text{ donde, } p = \frac{\Delta T^2}{\Delta L}$$

La obtención de las ecuaciones de trabajo (2), (3) y (4) complementa la profundización que deben realizar los estudiantes al consultar los textos básicos [3, 4], porque estos carecen de ese tratamiento didáctico, que es necesario para la aplicación del concepto de MAS en actividades experimentales.

En el diseño y montaje de la actividad experimental se utilizaron los siguientes materiales: péndulo simple, semicírculo escolar, sensor ultrasónico HCSR-04, microcontrolador *Arduino* UNO R3, cables de conexión, *protoboard* y computadora de trabajo.

El sensor ultrasónico HCSR-04 [14] tiene un emisor y un receptor de ultrasonidos, que permiten medir la distancia a la que se encuentra un objeto, enviando un pulso y midiendo el tiempo que transcurre hasta que retorna dicho pulso. Puede detectar objetos en un rango desde 0,03 m hasta 3,0 m, con una precisión de $\pm 0,001$ m.

El sensor consta de 4 pines [14]: *Vcc*, conectado a la salida de 5 V de la placa; *Trigger*, conectado al *pin* digital impar de la placa, encargado de enviar un pulso ultrasónico; *Echo*, conectado al *pin* de entrada digital par, que recibirá el eco de dicho pulso y GND, a tierra.

Si se tiene la distancia del objeto a la superficie donde impactó el pulso de ultrasonidos y se conoce la velocidad del sonido v , se puede determinar el tiempo t con la expresión:

$$t = \frac{2d}{v}. \quad (5)$$

La ecuación (5) permite calcular el periodo de oscilación del péndulo.

Arduino es una placa con un microcontrolador y los circuitos de soporte, que permiten programar el microcontrolador desde cualquier computadora, y hacer pruebas de comunicación con el propio *chip* [15].

Un *Arduino* UNO R3 tiene 14 pines digitales, que pueden configurarse como entrada o salida, a los que puede conectarse cualquier dispositivo que pueda transmitir o recibir señales digitales de 0 a 5 V. También dispone de 6 pines de entrada analógicos, que trasladan las señales a un conversor analógico/digital de 10 *bits* [15].

Las ventajas que tiene el uso de *Arduino* se expresan en que es de código abierto, por lo que se pueden construir muchos proyectos con posibilidades de desarrollo. Son flexibles y se puede trabajar en casi todas las plataformas informáticas.

Para que el sensor funcione se diseñó un péndulo que con fines didácticos es adecuado, pero que no es ideal, porque sus dimensiones no son puntuales, para que la superficie sea “visible” al sensor y el hilo es aproximadamente inextensible.

En la FIGURA 2 se muestra el diseño del montaje experimental, realizado por los estudiantes.

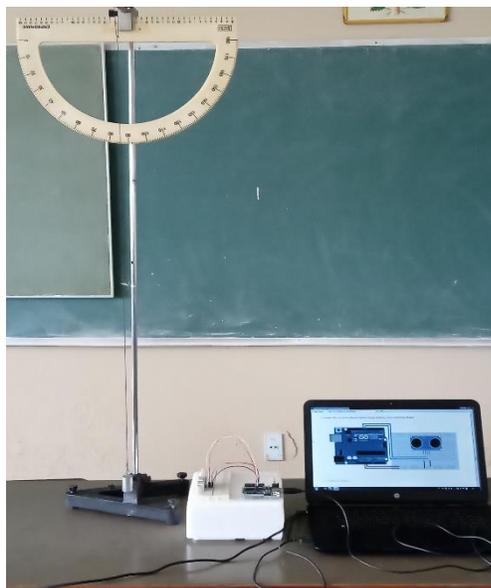


FIGURA 2. Se muestra el diseño del montaje experimental hecho por los estudiantes. Se debe notar el uso que se le da al semicírculo escolar para medir el ángulo de separación del péndulo de la posición de equilibrio. Fuente: elaboración propia.

El uso del semicírculo escolar garantiza que el ángulo de separación del péndulo de la posición de equilibrio, se mantenga pequeño, aproximadamente del orden de los 5°.

Para una correcta conexión del sensor HC-SR04 al microcontrolador *Arduino* UNO R3, hay que tener en cuenta las especificaciones técnicas del módulo del sensor, dadas en [14]. El *Trigger input* se conecta con el pin digital 9 y el *Echo* de salida al 8, como se muestra en la FIGURA 3.

Al calibrar el montaje los estudiantes deben asegurarse que el sensor se coloque frente al punto donde la masa alcance la máxima separación de su posición de equilibrio, para disminuir los posibles errores en las mediciones del periodo de oscilación.

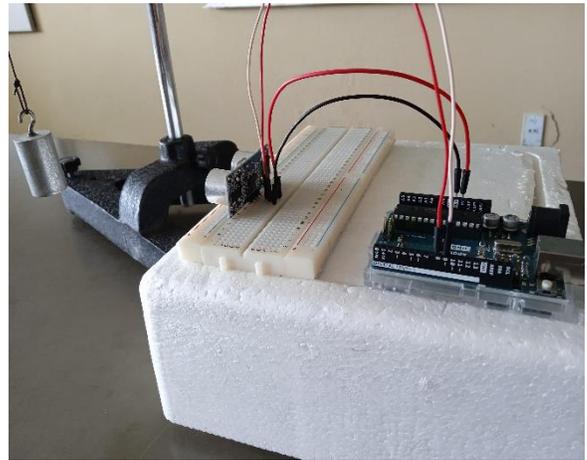


FIGURA 3. Se muestra la conexión del sensor HC-SR04. Fuente: Elaboración propia.

Una vez que ya el montaje ha sido codificado siguiendo la programación dada en [14], y puesto a punto, se comienzan a desarrollar las actividades, planificadas para dos sesiones de clases de 90 minutos cada una, con pequeños grupos de estudiantes del Segundo año de la carrera de referencia (2-3).

Se deben tomar algunas precauciones para no afectar las mediciones:

- El entorno debe estar libre de factores que perturben las oscilaciones del péndulo (corrientes de aire, otros objetos).
- Usar el semicírculo escolar para que el ángulo de las oscilaciones sea pequeño ($\approx 5^\circ$), y se aproxime a un MAS.
- Minimizar la influencia de la temperatura ambiente, la humedad y materiales reflectores sobre el sensor.

El enfoque didáctico a utilizar requiere de algunas acciones que debe realizar el profesor:

- Explicar el objetivo de la actividad experimental.
- Presentar el diseño y orientar el montaje del experimento a los estudiantes.
- Demostrar el funcionamiento de la programación.

Para familiarizarse con el montaje, los estudiantes primero miden L , desde el punto de suspensión hasta el centro de masa del objeto, con una regla graduada, cuya precisión es de $\pm 0,001$ m, y después T con un cronómetro, cuya precisión es de $\pm 0,01$ s. El tiempo se tomó para 10 ciclos, para atenuar los efectos del reflejo humano al accionar el cronómetro.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El proyecto que se propone a los estudiantes pretende introducir mejoras a un experimento tradicional, utilizado en la formación de profesores, y también en algunas instituciones educativas donde los estudiantes hacen su práctica laboral investigativa, que tienen cronómetros para la medición del tiempo, lo que influye en que las mediciones sean imprecisas.

Se solicita a los estudiantes que desarrollen un proyecto robótico con el objetivo de determinar g en Ciudad Escolar Libertad (CEL), utilizando un péndulo simple y un sensor ultrasónico HC-SR04 acoplado a un microcontrolador Arduino UNO R3.

Las actividades que deben realizar los estudiantes, se presentan a continuación.

Actividad 1. Realizar las mediciones del periodo del péndulo, obtenidas con el sistema de medición propuesto y calcular el valor de la aceleración de la gravedad en CEL.

a) Comparar el resultado obtenido con el reportado para La Habana.

Para hacer las mediciones de T , se activó el sistema experimental y se tomaron 10 mediciones, en cada uno de los cinco experimentos, en los que se varió la longitud L (0,60 m, 0,70 m, 0,80 m, 0,90 m y 1,0 m). Los demás parámetros se mantuvieron constantes (m y θ).

En la Tabla I se muestran los valores medios del cuadrado del periodo de oscilación T^2 para cada longitud del péndulo L y el cálculo del valor medio de la aceleración de la gravedad g con la ecuación (3), en las 10 mediciones automáticas que se realizaron.

TABLA I. Valores medios del cuadrado del periodo de oscilación T^2 para cada longitud del péndulo L y el cálculo de la aceleración de la gravedad g .

Exp. 1 (L = 0,60 m)		Exp. 2 (L = 0,70 m)		Exp. 3 (L = 0,80 m)		Exp. 4 (L = 0,70 m)		Exp. 2 (L = 0,70 m)	
T^2 (s ²)	g (m/s ²)								
2,4 2	9,76	2,8 3	9,75	3,2 4	9,74	3,6 4	9,76	4,0 5	9,75

El primer resultado obtenido es el cálculo numérico de g en CEL, utilizando la ecuación (3).

Se tiene que: $g_{CEL} = 9,75 \pm 0,01$ m/s², con un error aproximado de un 0,20%

$$\%error = \frac{9,76-9,74}{9,75} \times 100 = 0,20\%$$

El valor experimental de g fue obtenido por primera vez en La Habana, por el Doctor en Ciencias Físico-Matemáticas, Ingeniero Civil, Arquitecto y Profesor universitario Manuel Francisco Gran y Guilleo [16], alrededor de 1923, con un valor aproximado de 9,788 m/s². El péndulo utilizado por el

Profesor Gran se conserva como una reliquia histórica en la Facultad de Física de la Universidad de La Habana.

El valor de g reportado por el Instituto Nacional de Metrología de la República de Cuba, es de $g = 9,78$ m/s². Si se compara el valor obtenido en el experimento, con ese valor, se obtiene un margen de error de 0,3%, que es adecuado considerando que la actividad experimental fue realizada en el laboratorio escolar de la Universidad de referencia, con fines didácticos.

Una vez que se obtuvo el valor de la aceleración de la gravedad en CEL, mediante el cálculo numérico y su comparación con el reportado para La Habana, se propone la siguiente actividad a los estudiantes.

Actividad 2. Construya una gráfica que muestre el periodo de oscilaciones al cuadrado (T^2) del péndulo en unidades de segundos al cuadrado (s²), en función de la longitud (L) expresada en metros (m), para los cinco experimentos realizados.

- ¿Qué tipo de gráfica se obtiene?
- ¿Qué información ofrece la gráfica?
- ¿Cuál es el significado físico de la pendiente y qué valor tiene?
- ¿Coinciden los resultados experimentales con los reportados por la teoría?

Esta es otra forma de obtener el valor de g mediante la gráfica obtenida.

A diferencia del procedimiento empleado en [7,8] que usaron una hoja de cálculo de *Microsoft Excel* para graficar, se empleó una de las versiones de *GeoGebra*, siguiendo la pauta documentada en [17]. Este asistente matemático permite compartir y trabajar proyectos online, lo que facilita el trabajo en equipo y el aprendizaje colaborativo.

La ventaja de graficar con *GeoGebra* es que se puede tener un control detallado del tipo de función que se quiere ajustar en este caso una recta, aspecto que es más difícil de controlar en la hoja de cálculo de *Microsoft Excel*.

En la Gráfica 1 se muestra T^2 en su componente y, en función de L en su componente x con los datos de la Tabla I. La línea roja representa el ajuste de tendencia aplicando el modelo de regresión, que posibilita determinar el valor de la magnitud de g a partir de la pendiente de la recta ajustada, como se refiere en la ecuación (4).

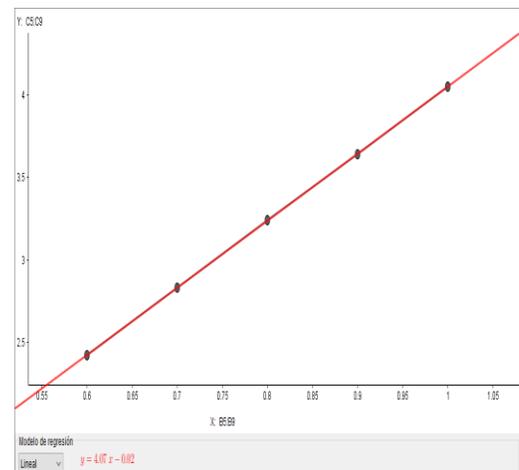


FIGURA 4. Período de oscilaciones al cuadrado en función de la longitud. Fuente. Elaboración propia.

La ecuación de la recta ajustada que se muestra en la figura:

$$T^2 = 4,07L - 0,02, \quad (6)$$

ofrece información útil para el estudio del movimiento oscilatorio del péndulo simple. En la gráfica se puede notar que T^2 aumenta proporcionalmente al incremento de la longitud del péndulo L . También se aprecia que el punto donde la recta corta al eje de las x que representa la longitud L , debe ser la longitud mínima (umbral) con un valor de 0,55 m, para que puedan hacerse las mediciones del periodo de oscilación con cierta exactitud.

Por otro lado, el intercepto de la recta con el eje y , que representa el cuadrado del periodo (T^2), permite apreciar el margen del error cometido en las mediciones del periodo de oscilación.

El valor de la pendiente p es de 4,07, que al sustituirlo en la ecuación (4), ofrece el valor de $g = 9,69 \pm 0.02 \text{ m/s}^2$, que difiere en 0,06% con respecto al cálculo numérico.

El análisis de los resultados revela que con estas actividades experimentales, se contribuye a formar habilidades en los estudiantes de la carrera profesoral de Física, tales como:

- Aplicar el concepto de MAS, a la solución de una situación problemática interesante.
- Identificar y manipular diferentes instrumentos de medición.
- Presentar y analizar adecuadamente los datos y resultados experimentales.
- Hallar relaciones entre variables a partir de datos experimentales.
- Aplicar relaciones interdisciplinarias entre Física, Matemática, Electrónica e Informática y la comunicación interpersonal.
- Usar la robótica educativa para la automatización de actividades experimentales.

La siguiente actividad es la orientación para la elaboración del informe de las actividades experimentales.

Actividad 3. Los estudiantes deben entregar un informe similar a un reporte científico, con los siguientes elementos:

- Identificación del equipo de estudiantes.
- Introducción sobre el diseño y el montaje experimental para darle solución al problema planteado.
- Presentar la solución de las actividades propuestas con datos, tablas, gráficas y valoraciones.
- Discusión de los resultados, comparando el valor obtenido con el valor reportado en la literatura.
- Valorar sobre la precisión de las mediciones efectuadas con el sensor HC-SR04. Referir las posibles fuentes de errores.
- Valorar si se considera adecuado el experimento para determinar g , mediante la automatización con Arduino.
- Ponderar las ventajas que ofrece desde un punto de vista didáctico, la automatización de actividades experimentales en la enseñanza y el aprendizaje de la Física.

Una vez realizadas estas actividades, se propondrán a los estudiantes otras preguntas para la sistematización en su estudio independiente, que deberán discutirse en el grupo:

- ¿Cómo Ud. definiría la aceleración de la gravedad?
- ¿Tiene un valor constante en la Tierra?

- ¿Tendrá g el mismo valor a 11 km de altura que a 11 km de profundidad en la Tierra? Justifique su respuesta.
 - Se hace un experimento con un péndulo simple para medir g en una estación en el polo norte y simultáneamente se hace el experimento en Quito, Ecuador. ¿Se obtendrá el mismo valor para g en ambos experimentos? ¿Por qué?
 - ¿Qué le sucede al valor de g cerca de yacimientos de minerales que se encuentran bajo tierra? ¿Por qué?
 - ¿Qué ocurriría si se repite este experimento en la Luna, sabiendo que la gravedad en la Luna es $g_L = 1,62 \text{ m/s}^2$?. Calcule el periodo de oscilación del péndulo diseñado en la Luna.
 - Haga una búsqueda bibliográfica sobre las aplicaciones prácticas que tiene el péndulo simple, valorando su uso.
 - ¿Qué adecuaciones didácticas le haría al montaje experimental utilizado, para poderlo desarrollar en las instituciones educativas de la Educación General cubana?
- Las actividades descritas fueron aplicadas en la asignatura Mecánica, con los estudiantes de Segundo año de la carrera profesoral de Física, y evidenciaron la importancia de la automatización de actividades experimentales con robótica educativa, utilizando un microcontrolador *Arduino* UNO R3. Con el uso de *Arduino* se motiva y potencia la creatividad de los estudiantes, relacionándolos con la ciencia, la tecnología y la innovación didáctica, que en la actualidad es una aspiración en la gestión de gobierno en Cuba.

Los estudiantes se apropian de manera más asequible e interesante de conceptos que son complejos para la comprensión. Al mismo tiempo se produce un aprendizaje colaborativo.

Además de apropiarse de los fundamentos de Física, los estudiantes se preparan en la asignatura Didáctica de la Física, para aplicar lo aprendido en las instituciones educativas de Secundaria Básica, Educación Preuniversitaria y Educación Técnica y profesional del Sistema Nacional de Educación.

De manera que este enfoque didáctico es una alternativa integradora y novedosa frente a las formas tradicionales de enseñanza.

IV. CONCLUSIONES

La actividad experimental utilizada permitió cumplir el objetivo de la automatización de una actividad experimental para la medición del valor local de la aceleración de la gravedad g , con un péndulo simple y *Arduino*.

El estudio realizado introdujo mejoras a un diseño experimental tradicional, utilizado en la formación de profesores. Al emplear la automatización de actividades experimentales, con el microcontrolador *Arduino*, se propicia un enfoque didáctico novedoso, por la forma en que los estudiantes se enfrentan a la solución de un proyecto interesante, que luego llevarán a su práctica laboral investigativa.

El primer resultado obtenido es el cálculo de g en CEL, que es de: $g_{CEL} = 9.75 \pm 0.01 \text{ m/s}^2$, con un error aproximado de un 0,20%. Se considera que el valor es adecuado, por lo que se puede asegurar que el experimento automatizado con

ayuda de la robótica, permitió determinar el valor de la aceleración de la gravedad g , con precisión.

El segundo resultado es la Gráfica de T^2 en función de L , siguiendo la relación dada en la ecuación (2) mediante *GeoGebra*, que posibilita determinar el valor de la magnitud de g a partir de la pendiente de la recta ajustada, como se refiere en la ecuación (4).

Se obtuvo el valor de $g = 9,69 \pm 0,02 \text{ m/s}^2$, con un error aproximado de un 0,41 %, ligeramente mayor que el alcanzado con los cálculos numéricos.

Los resultados obtenidos en éste estudio, se encuentran en el rango de los reportados mediante otras formas experimentales de la medición de la aceleración de la gravedad [8], considerando las condiciones del laboratorio escolar en las que se realizó el experimento.

En futuros estudios puede graficarse el valor del periodo de oscilación en función de la longitud del hilo, identificando el tipo de gráfica obtenida y analizando las relaciones entre las variables.

También puede diseñarse una actividad experimental similar, para el estudio del movimiento oscilatorio de un sistema masa-resorte y calcular la constante elástica del resorte.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Dr. C. Francisco Luis Pedroso Camejo, Profesor Titular del Departamento de Matemática-Física, en la Universidad de Ciencias Pedagógicas “Enrique José Varona”, Jefe de la carrera Licenciatura en Educación. Física y Jefe del Proyecto de Investigación No Asociado a Programa NA223LH508-28 “Actualización de la formación integral del profesor de Física y la educación energética en la sociedad contemporánea”, por facilitar apoyo documental y estar al tanto de la realización de las actividades experimentales.

REFERENCIAS

- [1] Solaz, J. J. y Sanjosé, V., *El papel del péndulo en la construcción del paradigma newtoniano*, Enseñanza de las Ciencias **10**, 95-100 (1992).
- [2] Pedroso, F.L., *Programa de la asignatura Mecánica*, Universidad de Ciencias Pedagógicas “Enrique José Varona”, La Habana (2017).
- [3] Resnick, R., Halliday, D. y Krane, K.S., *Física, Volumen*

I, Parte II, 4ta. Ed. (Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 2011).

- [4] Young, H. D. y Freedman, R.A., *Física Universitaria, Volumen 1*, 13era. Ed. (Editorial PEARSON, México, 2013).
- [5] Borroto, H., Becquer, M. y Calzadilla, O., *Evaluación de la Incertidumbre en la medición en el laboratorio introductorio de Física*, Latin American Journal of Physics Education **11**, 3305-1 (2017).
- [6] Grosskelwing, G., Martínez, E. A., Arieta, D. J., Jácome, H. A. y Cabrera, A., *El péndulo simple como propuesta didáctica para integrar teoría y práctica del diseño de experimentos en el aula de clase*, Revista Ingeniantes **1**, 03-09 (2022).
- [7] Martínez, J. E., *Obtención del valor de la aceleración de la gravedad en el laboratorio de física. Experiencia comparativa del sensor de un teléfono celular inteligente y el péndulo simple*, Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias **12**, 341–346 (2015).
- [8] Granados, N.E., *Péndulo simple*, Ponencia, Universidad Autónoma de México, (2022).
- [9] Experiment Manual for Intelligent Digital Experiment System (IDES), Physics part. Péndulo simple. pp. 21-24.
- [10] Hernández, A., *Fundamentos para una propuesta innovadora de la práctica de laboratorio “Estudio del péndulo simple” usando las posibilidades del sistema de prácticas de laboratorios asistidas por computadoras*, Revista Cubana de Física **39**, 21-26 (2022).
- [11] Dibarbora, C. Andreotti, J. y Grusko, I., *Computación en el profesorado de Física usando Scilab y Arduino*, Revista de Enseñanza de la Física **31**, 269-276 (2019).
- [12] Destéffani, T., *Experimento de Física com Arduino em aula remota: o problema do pêndulo simples*, Eletrônica Sala de Aula em Foco **XX**, 1-15 (2019).
- [13] González, S. L., González, R. R. y Vega, F., *Las investigaciones en Didáctica de la Física: tendencias en revistas especializadas (2015-2022)*, Opuntia Brava **15**, 142-155 (2023).
- [14] HC-SR04 Ultrasonic Sensor Module User Guide. <https://www.handsontec.com/datapecs/HC-SR04-Ultrasonic.pdf>.
- [15] Arduino UNO R3 Características y especificaciones. <https://proyectoarduino.com/arduino-uno-r3.pdf>.
- [16] Altshuler, J., *El maestro Manuel F. Gran, en el centenario de su incorporación al claustro universitario*, Revista Cubana de Física **40**, 67-68 (2023).
- [17] Vizcaino, D. F. y Castiblanco, O. L., *Un software como complemento para el análisis de la práctica experimental del péndulo*, Góndola **5**, 11-26 (2010).