

Evaluación de tres montajes experimentales para la práctica de laboratorio “Momento de inercia de un cuerpo rígido”



Arcelio A. Hernández Fereira, Ariel Hernández Gessa

*Departamento de Física, Universidad de Cienfuegos. Carretera a Rodas
Km. 21/2, Cuatro Caminos. Cienfuegos. Cuba. CP 55400.*

E-mail: archdez@ucf.edu.cu

(Recibido el 7 de Noviembre de 2010; aceptado el 8 de Marzo de 2011)

Resumen

Al estudiar la dinámica del movimiento de rotación se introduce el concepto de momento de inercia de un cuerpo rígido respecto a un eje de rotación y luego se particulariza para aquellos con simetría respecto al eje. Las fórmulas para el cálculo de los momentos de inercia de tales cuerpos se emplean en la solución de problemas, pero resulta importante dotar a los estudiantes del método para determinarlo experimentalmente y verificar dichas expresiones teóricas. Este es precisamente el objetivo comúnmente concebido para la práctica de laboratorio destinada a tales fines. En el trabajo se evalúan tres montajes experimentales, caracterizados por diferentes niveles de automatización de las mediciones y del procesamiento de los datos y se comparan entre sí atendiendo a un grupo de parámetros seleccionados a partir de criterios de expertos. Para cada caso se brindan las recomendaciones que potencien el empleo de dicho montaje como una práctica de laboratorio atractiva en el sistema de las que se desarrollan para la Mecánica.

Palabras clave: Prácticas de laboratorio, Física, momento de inercia, evaluación de montajes experimentales.

Abstract

During study of the dynamics of rotation we introduce the concept of moment of inertia of a rigid body about an axis of rotation and then particularized for those with symmetry about the axis. The formulas for calculating the moments of inertia of these bodies are used in solving problems, but it is important to provide students the method to determine experimentally and to verify the theoretical expressions. This is precisely the goal commonly designed for lab intended for such purposes. In the paper three experimental arrangements, characterized by different levels of automation in measurements and processing data and are evaluated and compared among them using for this purpose a selected group of parameters from expert criteria. For each case, provide recommendations to enhance the use of this assembly as an attractive lab in the system being developed for Mechanics.

Keywords: Laboratory works, Physics, moment of inertia, evaluation of experimental arrangements.

PACS: 01.50.Pa, 01.50.Qb, 01.50.Lc

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Las prácticas de laboratorio ocupan un lugar cada vez más importante en el proceso de enseñanza de las asignaturas, motivado en primer lugar por el carácter activo que le confieren al proceso de aprendizaje y porque contribuyen a objetivar el conocimiento, a hacerlo más consolidado y duradero. En segundo lugar, son, de las formas de enseñanza, las que más acercan al estudiante de forma natural al trabajo científico-investigativo; de esta manera, contribuyen al desarrollo de las habilidades para el trabajo científico y a que, cada vez más, predomine la lógica del mismo en su actividad profesional. Por último, la realización de las prácticas de laboratorio desarrolla las habilidades experimentales exclusivas de esta forma de enseñanza, las cuales no pueden lograrse por ninguna de las restantes [1, 2].

La contribución de la Física en la formación del ingeniero no se agota con la formación del cuadro físico del universo que presupone la comprensión de diversos fenómenos que se dan en la naturaleza o la fundamentación de la tecnología del mundo contemporáneo sino que debe incidir al mismo tiempo en el desarrollo de las habilidades profesionales que tipifican los modos de actuación del ingeniero. Esto se ha venido manifestando como tendencia desde hace dos décadas en la formación de los ingenieros [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10].

Consciente de lo anterior y con el propósito de elevar la calidad de la docencia universitaria, el Ministerio de Educación Superior de Cuba destinó un monto de un millón de dólares para la compra de equipos de laboratorio para la disciplina de Física de las carreras de Ciencias Técnicas y Ciencias Exactas, el cual se ejecutó a través de un crédito por dicho valor otorgado por la República Popular China y varias firmas de dicho país ofertaron los productos que poseían para estos fines. Desde el segundo semestre del

Arcelio A. Hernández Fereira y Ariel Hernández Gessa
 curso 2006-2007 empezaron a recibirse los equipos en las universidades.

Durante el segundo semestre del curso 2009-2010 y de manera simultánea con la docencia de las asignaturas que se impartieron, se llevó a cabo el trabajo que tenía como propósito incorporar los nuevos equipos adquiridos y encontrar soluciones con su aplicación a problemas que presentaban algunos equipos anteriores que perdían posibilidades de uso y se necesitaba continuar usando. Se evaluaron y compararon tres montajes experimentales con similar propósito y se encontró la manera de usarlos más eficientemente.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Características del primer montaje

En la Fig. 1 se muestra una foto del equipo empleado para la determinación experimental del momento de inercia de un cuerpo rígido. El mismo consta de una cruceta formada por cuatro varillas que se atornillan en un centro. La cruceta está ubicada en el mismo eje horizontal de una polea cónica de dos radios y montada en un rodamiento lubricado, por lo cual puede girar alrededor del eje de rotación con muy poca fricción. Alrededor de una de las poleas se enrolla un extremo de un hilo fino casi inextensible y de poca masa, el cual se hace pasar por otra polea de momento de inercia despreciable y en el otro extremo se cuelgan cuerpos de masas diferentes.

El sistema posee un pedestal sobre el cual se encuentran dos pares fuente luminosa-celda fotoeléctrica que están acopladas a un sistema electrónico para iniciar el conteo de tiempo y detenerlo cuando son interrumpidos los haces luminosos que llegan a las fotoceldas. Todo el sistema descansa en una base rectangular sólida que posee cuatro tornillos de nivelación para buscar su posición horizontal. El sistema también posee un sistema electromagnético para el frenado de las poleas y las crucetas una vez que los cuerpos han descendido

En la parte frontal aparece un display que muestra el tiempo entre las interrupciones de los pares fotoeléctrico superior e inferior por los cuerpos que bajan. El display está formado por 5 dígitos de diodos emisores de luz (LEDs) de 7 segmentos.

En la Fig. 2 presentamos un esquema del sistema. Aquí m es la masa en conjunto del gancho y la pesa que se cuelga, r es el radio de la polea alrededor de la cual enrollamos el hilo, T la tensión del hilo, I es el momento de inercia del conjunto respecto al eje que pasa por el centro de la polea y $M_{fricción}$ es el momento (o torque) de la fuerza de fricción que actúa sobre el eje de la polea. Podemos plantear las ecuaciones:

$$mg - T = ma \quad ; \quad Tr - M_{fricción} = I\alpha \quad ; \quad a = \alpha r. \quad (1)$$



FIGURA 1. Vista frontal del primer montaje.

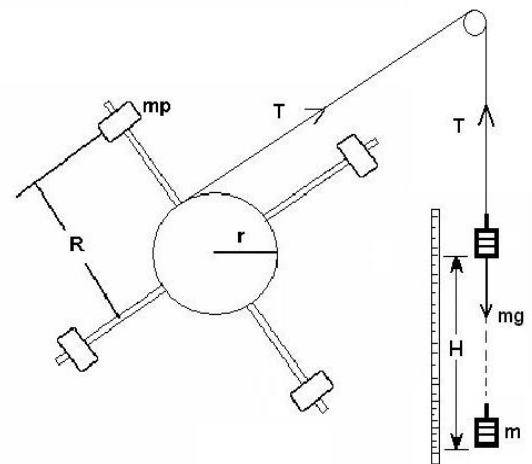


FIGURA 2. Esquema del primer montaje.

Combinadas convenientemente podemos obtener la ecuación de trabajo:

$$\alpha = \frac{a}{r} = \frac{1}{I} (mgr - M_{fricción}). \quad (2)$$

El propósito en esta práctica era verificar experimentalmente las relaciones obtenidas y con ellas encontrar el torque de las fuerzas de fricción y el momento de inercia I del sistema formado por la cruceta y las pesas fijadas a ella. Para ello se grafica la dependencia: α contra mgr que resulta lineal y de la cual obtenemos la pendiente, cuyo inverso resulta ser el momento de inercia del sistema y el intercepto con el eje de las X que es igual al torque de las fuerzas de fricción.

B. Características del segundo montaje

En la Fig. 3 se muestra una foto del sistema. En el mismo una cruceta formada por cuatro brazos (1) está ubicada sobre una polea cónica múltiple (2) de varios radios. Todo

el conjunto tiene un mismo eje común vertical que descansa sobre un rodamiento lubricado, por lo cual gira alrededor del eje de rotación con muy poca fricción.

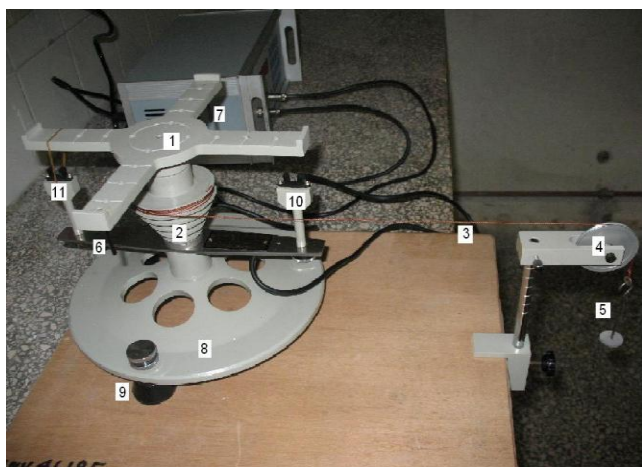


FIGURA 3. Vista lateral del segundo montaje.

Alrededor de una de las poleas se enrolla un extremo de un hilo fino casi inextensible y de poca masa (3) el cual se hace pasar por otra polea de momento de inercia despreciable (4) y en el otro extremo se cuelga un gancho (5) donde se colocan cuerpos de masas diferentes.

El sistema posee dos pedestales (10 y 11) situados a 180 grados entre sí sobre los cuales se encuentran dos opto pares de ranura (par celda fotoeléctrica con su emisor separado por una ranura de aire). En la parte inferior de dos de los brazos están ubicadas unas varillas negras delgadas (6 y 7) que hacen la función de barreras para interrumpir el haz de las celdas y activar el mecanismo de conteo del tiempo hasta la siguiente interrupción. Todo el sistema descansa en una base circular sólida (8) que posee tres tornillos de nivelación (9) para buscar su posición horizontal.

El conjunto se completa con un contador digital de milisegundos computarizado que se conecta a los pedestales donde se encuentran los opto pares de ranura. Este equipo mide los intervalos de tiempo con una precisión de una décima de milisegundo (10^{-4} s), entre un número programable de interrupciones del haz que también las cuenta, los almacena y además realiza cálculos con los mismos. En este caso calcula las aceleraciones angulares del sistema en el intervalo que el mismo realiza media revolución [11].

En la Fig. 4 presentamos un esquema del sistema. Aquí m es la masa en conjunto del gancho y la pesa que se cuelga, r es el radio de la polea alrededor de la cual enrollamos el hilo, T la tensión del hilo e I_0 es el momento de inercia de una cruceta que gira respecto al eje OO' .

Para este sistema, cuando no está actuando la tensión del hilo, podemos plantear la siguiente ecuación:

$$-M_{fricción} = I_0 \alpha_2. \quad (3)$$

Siendo α_2 la aceleración angular del sistema sometido sólo al torque de la fuerza de fricción que actúa sobre el eje de giro (aceleración retardadora).

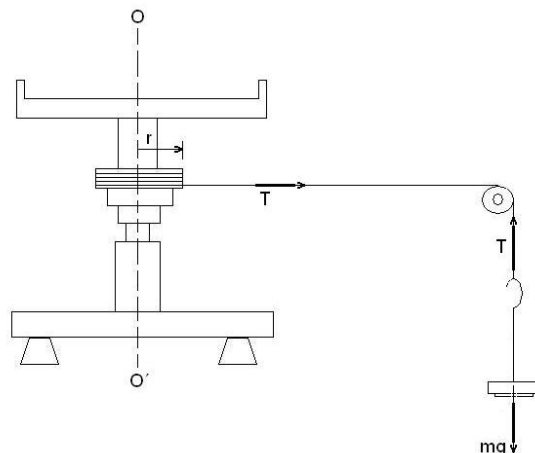


FIGURA 4. Esquema con los parámetros del segundo montaje.

Cuando está actuando la tensión del hilo enrollado alrededor de la polea del cual cuelga el gancho con pesas las ecuaciones son:

$$mg - T = ma_1; Tr - M_{fricción} = I_0 \alpha_1; a_1 = \alpha_1 r. \quad (4)$$

Aquí α_1 es la aceleración angular del sistema cuando se haya sometido a los torques del hilo y de la fuerza de fricción sobre el eje y a_1 la aceleración lineal con que desciende el gancho con pesas. Combinando de forma adecuada las ecuaciones anteriores se puede obtener:

$$I_0 = \frac{mgr}{\alpha_2 + \alpha_1} - \frac{\alpha_2}{\alpha_2 + \alpha_1} mr^2. \quad (5)$$

Que es la ecuación que usaremos para determinar los momentos de inercia a partir de medir las aceleraciones angulares α_1 y α_2 del sistema bajo la acción de la tensión del hilo y sin él.

Si se añade a la cruceta algún otro cuerpo y se repite el procedimiento se podrá calcular el momento de inercia del sistema resultante, digamos I_2 , que de acuerdo con el teorema de los ejes paralelos, será la suma de los momentos de inercia de cada cuerpo que lo integra respecto al eje. Por diferencia se puede determinar el momento de inercia del cuerpo que se situó sobre la cruceta.

$$I_2 = I_0 + I_1 \Rightarrow I_1 = I_2 - I_0. \quad (6)$$

Para determinar las aceleraciones angulares α_1 y α_2 el contador digital de milisegundos computarizado mide y registra los intervalos de tiempo en que el sistema rota 180 grados (π radianes) que es la distancia angular entre dos opto pares. Como todos los desplazamientos angulares serán múltiplos de π radianes: $\theta = K\pi$ y se puede escribir:

$$\alpha = \frac{2\pi(K_2 t_1 - K_1 t_2)}{t_1 t_2 (t_2 - t_1)} \quad (7)$$

Aquí K_1 y K_2 son los números enteros que determinan el número de giros de 180° que ejecuta el sistema. En nuestro caso son consecutivos y por lo tanto difieren en una unidad. Esta fórmula la tiene programada el contador digital de milisegundos computarizado y después que mide los intervalos de tiempo cuando el sistema está acelerado y luego desacelerado puede brindar los valores de α_1 y α_2 que sustituimos en la expresión (2) para hallar el momento de inercia [12].

C. Características del tercer montaje

En el manual de aplicaciones que acompaña al sistema de prácticas de laboratorio de Física asistido por computadoras HPCI-1 [13, 14], aparece un montaje para determinar el momento de inercia de un cuerpo a partir de un equipo como el que se muestra en la Fig. 5. Nuestro centro no recibió este equipo, pero como se puede apreciar posee el mismo principio que el primer montaje, solo que el eje de giro de este último es vertical.

Es por ello que decidimos utilizar la compuerta fotoeléctrica tipo A del sistema HPCI-1, que es un par emisor infrarrojo-foto detector, que conectado a un sistema electrónico puede registrar los instantes de tiempo en los cuales se produce la interrupción y el restablecimiento del haz que llega al foto detector desde el emisor. Con estos valores de tiempo se pueden calcular diferentes intervalos de tiempo determinados por dichas interrupciones y restablecimientos.

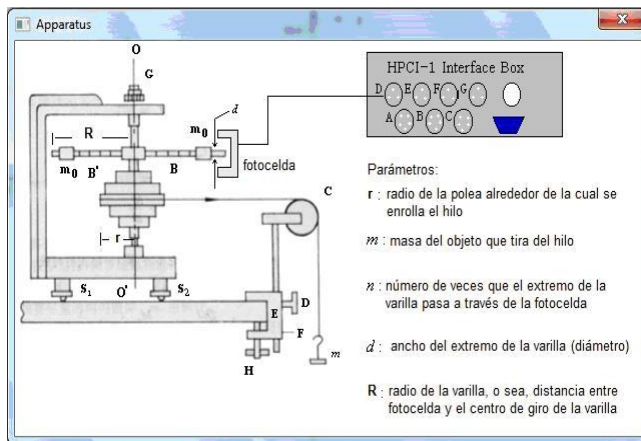


FIGURA 5. Esquema del equipo que acompaña al sistema HPCI-1 para determinar el momento de inercia.

El equipo del sistema HPCI-1 está diseñado para determinar el momento de inercia de un cuerpo compuesto por par de varillas situadas a 180° una de la otra y con dos cuerpos atornillados en una posición cercana a sus extremos a partir de la medición de los instantes de tiempo en que las varillas interrumpen el haz en la fotocompuesta. En el fundamento teórico brindado por los fabricantes chinos no se toma en cuenta el momento o torque de la fuerza de fricción del cojinete o rodamiento alrededor del cual gira el conjunto ni cómo determinarlo. Las ecuaciones que aparecen allí [14] son las siguientes:

$$\begin{aligned} \sum \tau &= Tr = I\alpha \\ \sum F &= mg - T = ma_T \\ a_T &= \alpha r \end{aligned} \quad (8)$$

De aquí resulta simple derivar la expresión que emplean para determinar el momento de inercia: $I = m \left[\frac{gr}{\alpha} - r^2 \right]$ la

cual se puede escribir: $m = I \left[\frac{\alpha}{gr - \alpha r^2} \right]$ Al factor que

aparece entre corchetes le llaman **b** y si se construye una gráfica de **m** contra **b** resulta ser lineal y su pendiente sería el momento de inercia I. Está claro que el sistema debe determinar la aceleración angular α a partir de las mediciones de tiempo provenientes del paso de la varilla a través de la foto compuerta y del intervalo de tiempo que media hasta el siguiente paso. Para ello pide como datos de entrada el diámetro de la varilla (d), el radio de la polea en la que está enrollada la cuerda (r) y la distancia del centro de la varilla al punto que pasa por la foto compuerta (R) y el número de interrupciones (n) que sufrirá el haz de la fotocompuesta.

Como una facilidad del sistema, el mismo muestra los intervalos de tiempo que demora la varilla en atravesar la foto compuerta (dt_n) y los valores del tiempo transcurrido a partir de que fue interrumpido por primera vez el haz hasta las siguientes interrupciones (t_n). En la Fig. 6 se muestra el aspecto de dichos datos tal y como los muestra en la pantalla de la computadora.

No.	dt1/s	t2/s	dt2/s	t3/s	dt3/s	t4/s
1	0.014482	2.378195	0.013819	4.103741	0.008585	5.518839
2	0.015026	2.593861	0.015543	4.449298	0.008953	5.931003
3	0.014799	2.531520	0.015558	4.400197	0.009006	5.890184
4	0.013942	2.217502	0.012209	3.625096	0.007601	4.858913
5	0.013970	2.238606	0.012338	3.753865	0.007745	5.014354

FIGURA 6. Aspecto de los datos relativos al tiempo tal y como los muestra el sistema en la pantalla de la computadora.

Al desplegar el menú de experimentos de Mecánica del sistema HPCI-1 y seleccionar el número 16 (momentum angular) aparece una interfase con varias cajas de diálogo para introducir los valores de las magnitudes que aparecen en el esquema del equipo (R, r, m, n, d). Cuando estos datos se ingresan se libera el sistema para que ejecute el movimiento de rotación del conjunto bajo la acción del torque de la tensión del hilo conectado al gancho con pesas que descende. Al concluir el número de interrupciones previstas el sistema calcula la aceleración angular (que ellos denotan por β), el parámetro b y el momento de inercia I . Al realizar las mediciones para varios valores de la masa del gancho y las pesas las representa en una gráfica de m contra b y halla la recta de mejor ajuste por lo mínimos cuadrados. De aquí ofrece el valor del momento de inercia. Todos estos detalles se observan en la Fig. 8.

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

A. Primer montaje.

Se siguió el procedimiento experimental para determinar las aceleraciones lineales y angulares y usando Excel se construyó la dependencia α contra mgr que aparece en la Fig.7.

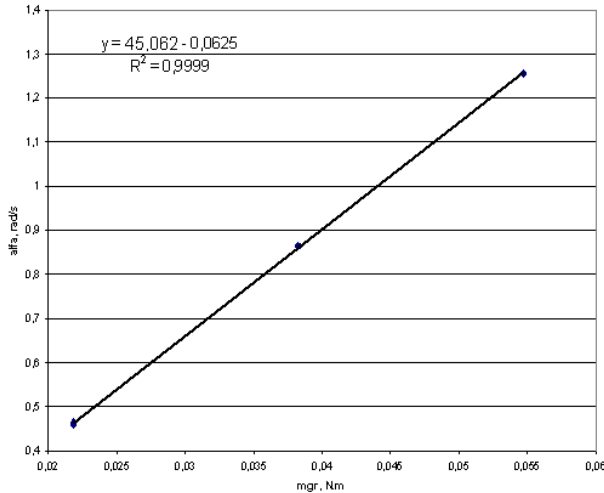


FIGURA 7. Gráfica de α contra mgr

De la recta de ajuste en la Fig. 7 se obtiene la pendiente cuyo valor inverso $0,02378 \text{ kg.m}^2$ corresponde al momento de inercia del mismo conjunto. Estos valores se aproximan al valor teórico calculado para el mismo de 0.02608 kg.m^2 .

B. Segundo montaje

Se siguió el procedimiento experimental para determinar para los distintos cuerpos las aceleraciones α_1 y α_2 para reemplazar en la expresión (5) y encontrar el momento de inercia. Para ello se empleó Excel. Inicialmente se midió el momento de inercia de la cruceta y luego se fueron incorporando cuerpos a la misma y midiendo de nuevo el momento de inercia para hallarlo por diferencia como anotamos anteriormente. Los resultados obtenidos por el alumno ayudante se muestran de forma resumida en la Tabla I. Como se puede apreciar los resultados son muy buenos y los errores relativos respecto a los valores teóricos resultan pequeños.

TABLA I. Resumen de resultados obtenidos para diferentes cuerpos con el segundo montaje

Cuerpo	Fórmula del momento de inercia teórico	Momento de inercia teórico, kg.m^2	Momento de inercia experimental, kg.m^2	Error relativo (%)
Cruceta del equipo	---	----	0.001864	---
2 cuerpos de 0,1 kg a 0.025 m	$2mR^2$	0.000125	0.000130	4
2 cuerpos de 0,1 kg a 0.05 m	$2mR^2$	0.005	0.000499	0.2
2 cuerpos de 0,1 kg a 0.075 m	$2mR^2$	0.001125	0.001108	1.5
2 cuerpos de 0,1 kg a 0.1 m	$2mR^2$	0.002000	0.001953	2.4
Aro de 0.506 kg y R = 0.1125 m	MR^2	0.006404	0.006252	2.4
Aro de 1.01 kg y R = 0.1125 m	MR^2	0.01278	0.01275	0.02
Disco de 0.5 kg y R = 0.12 m	$1/2MR^2$	0.003600	0.003763	4.5
Disco + Aro ligero	$1/2MR^2 + MR^2$	0.00100	0.009626	3

TABLA II. Comparación de los resultados experimentales que ofrece el sistema HCPI-1 con los valores teóricos.

Experimento	Valor teórico	Valor experimental	Error relativo (%)
Con tres pesas	$0,02608 \text{ kg.m}^2$	$0,017670 \text{ kg.m}^2$	32,24
Con seis pesas	$0,02608 \text{ kg.m}^2$	$0,018759 \text{ kg.m}^2$	28,07

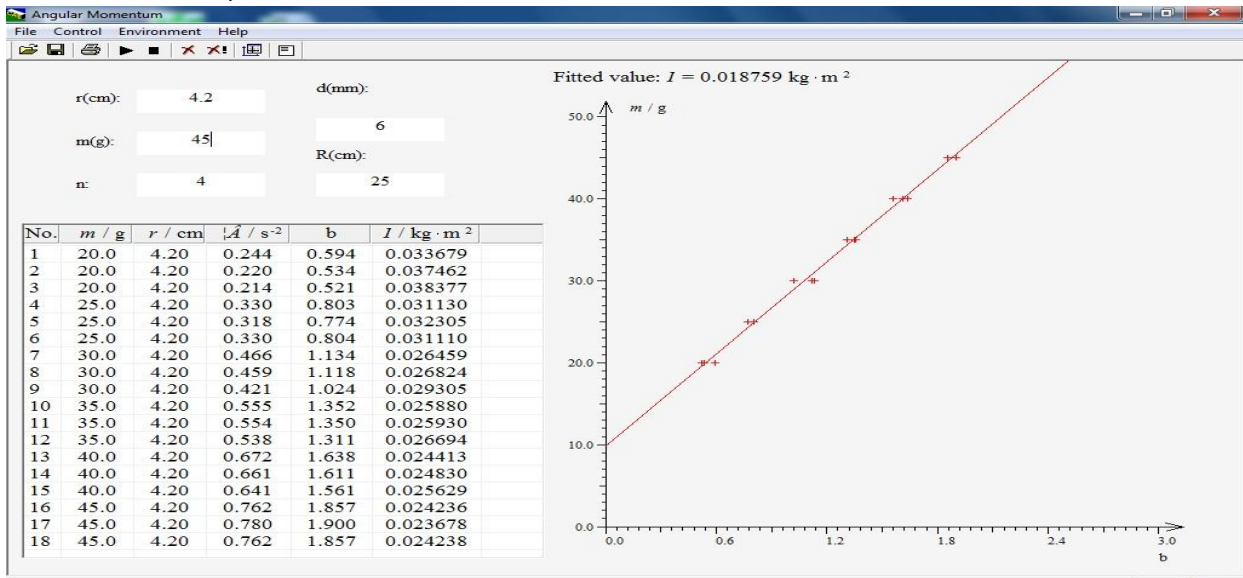


FIGURA 8. Resultados que brinda el sistema para el equipo polaco con seis pesas.

C. Tercer montaje

Realizamos las corridas experimentales usando el equipo del primer montaje con dos varillas y con las tres pesas que lo acompañan de 53, 93 y 133g y el mismo ofreció el valor de 0.017670kg.m² para el momento de inercia del conjunto. Sin embargo, los valores teóricos calculados para el momento de inercia para la cruceta de dos varillas y dos cuerpos a partir de medir su longitud, su masa y las distancias al centro diferían significativamente del valor que reporta el sistema.

$$I_{teórico} = 2\left(\frac{1}{3}ML^2\right) + 2m_p R^2 = 0.02608kg m^2$$

Repetimos los experimentos una vez más aumentando ahora el número de pesas empleadas y entonces usamos un gancho con pesas cuya masa varió cada 5g en el intervalo de 20 a 45g. Los resultados que ofrece el equipo se muestran en la Fig. 8.

Como se observa, de nuevo el valor del momento de inercia (0.01876) no corresponde con el valor teórico calculado y al igual que en el caso anterior resulta inferior. Ver Tabla II.

Nos dimos a la tarea entonces de tratar de instrumentar las mediciones de la aceleración angular y emplearla en las expresiones del montaje original que tiene en cuenta el torque de la fuerza de fricción. También decidimos usar el algoritmo del segundo sistema para calcular las aceleraciones angulares usando la información de los tiempos que ofrece el sistema HPCI-1.

Así, cuando nuestro sistema tenía dos varillas con pesas, realizaba 4 interrupciones, los desplazamientos angulares entre ellas eran múltiplos de π y se podían calcular tres valores para la aceleración angular y promediar las mismas. La expresión para ello sería:

$$\alpha_n = \frac{2\pi[(n+1)t_n - (n)t_{n+1}]}{t_n t_{n+1} (t_{n+1} - t_n)} \tag{9}$$

Si ponemos cuatro varillas con pesas, las interrupciones son ocho, los desplazamientos angulares son múltiplos de π/2 y la ecuación para calcular las seis aceleraciones y promediarlas sería:

$$\alpha_n = \frac{\pi[(n+1)t_n - (n)t_{n+1}]}{t_n t_{n+1} (t_{n+1} - t_n)} \tag{10}$$

Con los valores de los tiempos se calculó la aceleración angular con ayuda de las expresiones anteriores y construimos la dependencia de α contra mgr, que resulta lineal. Su pendiente es el inverso del momento de inercia y su intercepto con el eje de las x el valor del torque de las fuerzas de fricción.

También construimos la gráfica de m contra b como lo hace el sistema HPCI-1, pero con los valores de α calculados según nuestro procedimiento.

Los resultados para el experimento de seis pesas pero con solo dos varillas con pesas de 191g fijadas a 25cm. se muestran en las Figs. 9 y 10.

De la recta de ajuste en la Fig. 9 se obtiene la pendiente con valor 0.02299kg.m² que corresponde al momento de inercia del conjunto formado por las dos varillas y las dos pesas y de la recta de ajuste en la Fig. 10 se obtiene la pendiente, cuyo valor inverso 0.02378kg.m² corresponde al momento de inercia del mismo conjunto. Estos valores se aproximan mejor al valor teórico calculado para el mismo.

Realizamos también el experimento con el conjunto formado por cuatro varillas a cada una de las cuales se fijaba una masa de 191g a una distancia de 22cm. En este caso el momento de inercia teórico calculado para el conjunto sería:

$$I_{teórico} = 4\left(\frac{1}{3}ML^2\right) + 4m_p R^2 = 0.04139 \text{ kg m}^2$$

efectuadas las mediciones por el alumno ayudante en base a esta guía, se procedió a comparar los montajes.

Para ello se tomaron los siguientes criterios de comparación:

- 1) Propósitos (objetivos a satisfacer) de todos los equipos.
- 2) Simplicidad del fundamento teórico, grado de complejidad del proceso de deducción de las ecuaciones de trabajo.
- 3) Proceso de obtención de las magnitudes involucradas en las ecuaciones de trabajo (magnitudes directas o indirectas).
- 4) Precisión con que se pueden especificar las magnitudes.
- 5) Tratamiento necesario a partir de las ecuaciones de trabajo para obtener las magnitudes deseadas.
- 6) Grado de repetibilidad de los experimentos.
- 7) Posibilidad de verificar los resultados con la teoría.
- 8) Posibilidades de variantes diferentes a plantear a los estudiantes.

En la Tabla IV se resume la evaluación otorgada a cada uno de los criterios empleados para la comparación entre los montajes. Como se puede observar el segundo montaje supera al resto y por ello se decidió incluirlo entre las prácticas de laboratorio de la asignatura Física I en el presente curso. Esta práctica se realizó simultáneamente con el primer montaje y la acogida por parte de los estudiantes fue buena así como la asimilación del fundamento teórico y del procedimiento experimental.

El tercer montaje, que resulta ser el primero pero midiendo los tiempos en que se ejecutan las rotaciones del sistema con ayuda de las facilidades del sistema HCPI-1, ofrece buenos resultados si se procesan dichos tiempos para encontrar la aceleración angular con el método usado en el segundo montaje. El que ofrece el sistema HCPI-1 brinda resultados incorrectos. Si se le aumenta el número de pesas en el gancho y se explotan sus posibilidades para realizar variantes distintas resulta un buen montaje que se puede desarrollar simultáneamente con el segundo.

IV. CONCLUSIONES

1) El segundo montaje resulta el más completo por reunir las mejores características de acuerdo a los criterios usados para su evaluación.

2) El tercer montaje, que resulta de emplear las facilidades del sistema HCPI-1 para el registro de los intervalos de tiempo de rotación para el equipo empleado en el primer montaje y su procesamiento para calcular la aceleración angular por el método del segundo, le sigue al segundo porque brinda los resultados más satisfactorios y se puede simultanear con él en las prácticas de laboratorio.

3) Es preciso diseñar las guías de manera que se exploten las posibilidades de los dos equipos y sobre todo se superen los posibles puntos débiles de los mismos.

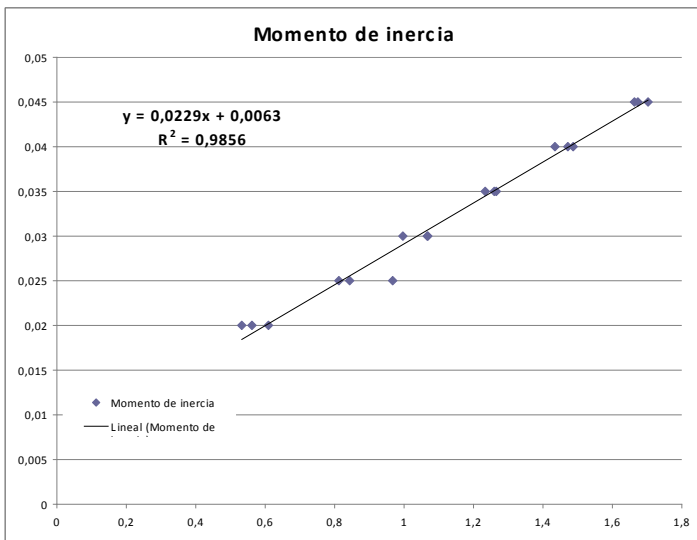


FIGURA 9. Gráfica de m contra el parámetro b .

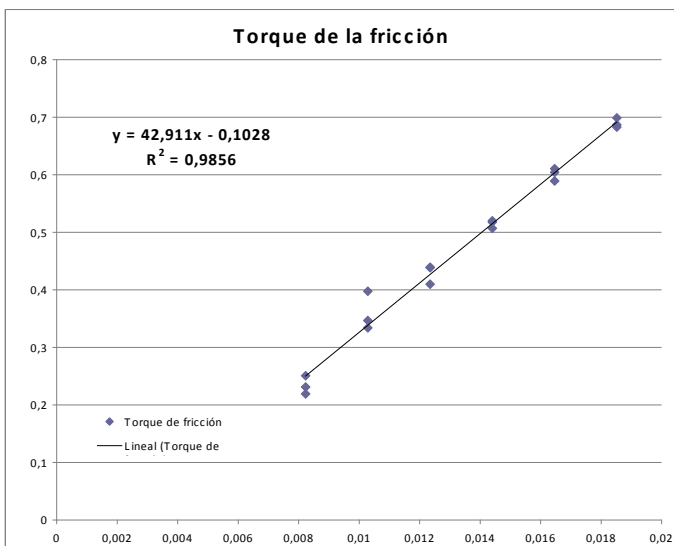


FIGURA 10. Gráfico de α contra mgr .

Ensayamos con tres pesas de 53, 93 y 133g en el gancho para provocar el torque motriz. En la Tabla III se resumen los resultados obtenidos y los errores relativos calculados para cada conjunto usando los dos procedimientos para calcular la aceleración angular.

Como se puede apreciar los resultados obtenidos son muy satisfactorios y superan a los que brindaba el sistema HCPI-1 en su forma original.

Una vez concluidas las tareas del montaje y puesta a punto de los equipos, realizadas las corridas experimentales de prueba, escrita la guía de la práctica de laboratorio y

TABLA III. Comparación de los resultados experimentales con los valores teóricos con el nuevo procedimiento para calcular las aceleraciones procesadas según el fundamento del primer montaje y según el del sistema HCPI-1.

Conjunto	Valor teórico	Valor experimental		Error relativo (%)	
		HCPI-1	Polaco	HCPI-1	Polaco
Dos varillas y dos pesas	0,02608 kg.m ²	0,02299 kg.m ²	0,02378 kg.m ²	10,66	8,8
Cuatro varillas y cuatro pesas	0,04139 kg.m ²	0,04120 kg.m ²	0,04148 kg.m ²	0,45	0,22

TABLA IV. Comparación entre los montajes atendiendo a los criterios definidos.

Montaje	Criterios de comparación							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Primero	Idénticos	Complejo	Indirectas	Mediana (y pocas repeticiones en algunos ejercicios)	Requiere ajustes y cálculos	Intermedia	Es posible	Pocas (dos poleas y diferentes radios R para las pesas). Solo tres pesas para el gancho.
Segundo	Idénticos	Sencillo	Directas	Alta (y un número apreciable de mediciones)	Cálculo directo	Alta	Es posible	Gran número de variantes (siete poleas y muchos cuerpos)
Primero con método propuesto en el HCPI-1	Idénticos	Sencillo, pero con limitaciones	Indirectas	Alta (y un número apreciable de mediciones)	No requiere de cálculos, pero el estudiante no participa de forma activa.	Alta, pero con poca relación con los resultados teóricos.	Es posible	Puede incrementarse respecto al original el número de pesas en el gancho y conservar las otras fuentes de variantes distintas.
Primero con método de cálculo del segundo y datos adquiridos por medio del HCPI-1.	Idénticos	Intermedio	Indirectas	Alta (y un número apreciable de mediciones)	Requiere ajustes y cálculos	Alta	Es posible	Puede incrementarse respecto al original el número de pesas en el gancho y conservar las otras fuentes de variantes distintas.

V. REFERENCIAS

[1] Hernández, F. A., Jiménez, C. G., Arévalo, V. Z. *Las prácticas laboratorio por proyecto y su impacto en el desarrollo de las habilidades en los estudiantes*, Anuario Científico Universidad de Cienfuegos, (Universidad de Cienfuegos, Cuba, 2002).
 [2] Hernández, F. A., *Los niveles de asimilación del contenido: una pauta para la organización de las prácticas de laboratorio*, Revista Actas Pedagógicas. Universidad de Ibagué, Colombia **5**, 42-48 (2001).

[3] Del Risco, L., Hernández, A., *Propuesta metodológica para interrelacionar las habilidades de la disciplina Física con las profesionales del Ingeniero Mecánico*, En CD de trabajos presentados en la Conferencia Científica Internacional de Ingeniería Mecánica COMEC (2008). Universidad Central de Las Villas. ISBN-978-959-250-404-2.
 [4] Álvarez, C., *Nuevas tendencias en la enseñanza de la ingeniería*, Revista Cubana de la Educación Superior **3**, 41-50 (1994).
 [5] *Informe Technion sobre la enseñanza de la ingeniería*,

Revista Cubana de la Educación Superior **1**, 23-28 (1990).

[6] Álvarez, C., *Tendencias en la enseñanza de la Física para ingenieros en Cuba*, Revista Cubana de Educación Superior **2**, 109-121 (1986).

[7] Hernández, F. A., Hernández, G. A., y Tsering, S., *Implementación de un sistema de prácticas de laboratorio para la asignatura Física III de la carrera de Ingeniería Mecánica y evaluación de su impacto en la calidad de las mismas y en la formación del profesional*, En CD de trabajos presentados en la Conferencia Científica Internacional de Ingeniería Mecánica COMEC (2008). Universidad Central de Las Villas. ISBN-978-959-250-404-2.

[8] Hernández, F. A., Hernández, G. A., y Tsering, S., *Sistema de prácticas de laboratorio para la asignatura Física III de Ingeniería Mecánica y evaluación de su impacto en la calidad y formación del profesional*, En CD Memorias del V Taller Iberoamericano de Enseñanza de la Física Universitaria. pp. 333-338. Universidad de la Habana. ISBN-978-959-16-0964-9, 2009.

[9] Horrutinier, P., *El perfeccionamiento del sistema de conocimientos de la disciplina Física para estudiantes de ingeniería*, (Ediciones ISPJAM, La Habana, 1988).

[10] Fariñas, G., *Una estrategia para el futuro: El proceso docente orientado a la formación de habilidades*, Revista Cubana de Educación Superior **2**, 87-96 (1988).

[11] *Experimental Instrument for Measuring Rotation Inertia of the Smart Rigid Body. Model GZ-2A*. Beijing, (2005), p. 62.

[12] *Instructions for Computer Digital Millisecond Meter, GZ-2A*. Beijing, (2005), p. 7.

[13] *HCPI-1 Computer Aided Physics Laboratory. Experiment Manual. Version 4.0. U-Star Sensor Technology Co., Ltd.* Beijing, (2005), p. 85.

[14] *HCPI-1 Computer Aided Physics Laboratory. Application Manual. Version 4.0. U-Star Sensor Technology Co., Ltd.* Beijing, (2005), p. 54.