

# Experimentos de mecánica con temporizador de bajo costo

(Mechanics experiments with low cost timer)

Carlos Andrés Collazos Morales<sup>1,2,3</sup> y César Mora<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Física, Universidad Manuela Beltrán, Bogotá D.C., Colombia

<sup>2</sup>Departamento de Ciencias Naturales, Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá D.C., Colombia

<sup>3</sup>Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Instituto Politécnico Nacional, México D.F., México

Recibido em 24/1/2012; Aceito em 30/4/2012; Publicado em 7/12/2012

Se ha construido un sistema mecánico que consta de una base y un eje vertical que sostiene un riel. En los extremos del riel se han acondicionado dos fotoceldas las cuales han sido diseñadas y construidas para medir intervalos de tiempo de sólidos rígidos que se desplazan sobre el riel y que pasan por las fotoceldas. El prototipo es de bajo costo y es utilizado para prácticas de laboratorio a nivel de cinemática y dinámica de traslación, y dinámica del sólido rígido en cursos de mecánica.

**Palabras-clave:** diseño de experimentos, circuitos y componentes de circuito.

We have made a mechanical system that consists of a base and a vertical axis that supports a rail. In the ends of the rail two photogates have been prepared. The photogates have been designed and constructed to measure time intervals of rigid solids that move on the rail and that happen for the photogates. The prototype is of low cost and is used for practices of laboratory concerning with kinematics and dynamics of translation, and dynamics of the rigid solid in mechanics courses.

**Keywords:** design of experiments, circuits and circuit components.

## 1. Introducción

En los laboratorios de los cursos de Física a nivel Mecánica, la medida de intervalos de tiempo del orden de centésimas de segundo es prioritaria para obtener registros aceptables en cinemática y dinámica. En Refs. [1, 2] se presentan temporizadores de bajo costo con diversos enfoques a nivel de mecánica. En Refs. [3, 4] se presentan cámaras digitales de precisión como instrumentos de medida de tiempo. Este trabajo presenta los experimentos con un temporizador de bajo costo que consiste de un sistema mecánico con base y un eje vertical que sostiene un riel horizontal al cual se le puede variar el ángulo de inclinación respecto a la vertical. En los extremos de riel se han acondicionado dos fotoceldas que permiten medir intervalos de tiempo de sólidos rígidos que se desplazan entre las fotoceldas. Las fotoceldas son dos circuitos eléctricos idénticos que permiten medir tiempo y que se conforman por un sensor infrarrojo de proximidad que recibe un haz proyectado por un diodo infrarrojo. Cuando el haz es interrumpido por el paso de un sólido que se traslada sobre el riel se activa un cronómetro el cual mide el tiempo que el sólido emplea en recorrer la distancia entre las fotoceldas. Las fotoceldas se pueden movilizar sobre el riel y

permiten variar la distancia entre ellas. El artículo se ha estructurado de la siguiente manera. En la sección 2 se indica cada una de las partes que conforman el prototipo y costo. En la sección 3 se presenta el plano electrónico de las fotoceldas. En la sección 4 se indica los experimentos donde es usado el temporizador. En la sección 5 se indican las conclusiones de este trabajo.

## 2. Partes y costo del prototipo

El prototipo armado en su mayor parte es de aluminio y sus dimensiones son presentadas en la Fig. 1. En el prototipo se distingue el soporte vertical con la base, batería (caja de pilas) y el riel que es un canal donde puede desplazarse un sólido rígido (esfera). Las fotoceldas se ubican en los extremos del riel y son deslizables. El cronómetro es de dos pads, en cada uno de los pads hay dos pulsadores (start y reset) que activan cada una de las funciones del cronómetro. La manipulación del cronómetro se centro en el pad izquierdo (start) como se indica en Ref. [5].

Los materiales empleados y el costo respectivo pueden variar dependiendo de los proveedores, sin embargo el valor oscila aproximadamente en US\$ 60

<sup>1</sup>E-mail: cacollazos@gmail.com.

dolares americanos.

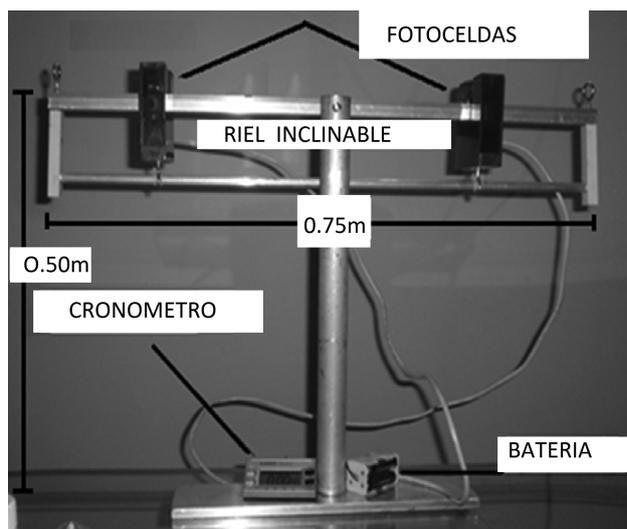


Figure 1 - Prototipo [5].

### 3. Plano eléctrico de fotoceldas

En lo que respecta a la construcción de la parte eléctrica se debe tener presente el control del cronómetro, el potencial del circuito y del cronómetro, la recepción de señales y la conmutación de las mismas para la activación del cronómetro. El sistema funciona con 4.8 V los cuales los proveen una caja de 4 baterías AA de 1.2 V. El LED infrarrojo (MLED81) se activa con 5 V y tiene un grosor de haz  $\pm 30^\circ$ . El detalle de las especificaciones técnicas del LED infrarrojo se encuentra en Ref. [6]. Por otra parte el potencial del cronómetro y las fotoceldas deben ir a las terminales del transistor (2N2222) para poder hacer la conmutación y controlar las salidas de potencial. La obtención de las ecuaciones de los lazos cerrados del transistor permitió obtener los valores de las resistencias de base (R4) y colector (R3). Las especificaciones técnicas del transistor se encuentran en [7]. La recepción y envío de señal se realiza por el principal componente del sistema, el cual es el sensor infrarrojo (IS471F). El detalle de las especificaciones técnicas del sensor puede ser consultado en Ref. [8]. El sensor infrarrojo es un circuito integrado que cumple las funciones de:

- Oscilador: Envía un tren de pulsos en forma de onda cuadrada.
- Modulador: Introduce la señal que envía el diodo infrarrojo (MLED81) en el tren de pulsos.
- Filtro Pasa Altos: Deja pasar niveles altos de voltaje a partir de la frecuencia de corte.
- Demodulador: Devuelve el tren de pulsos.

Es importante resaltar que el uso del sensor (IS471F) simplifica el proceso en comparación con temporizadores que involucran el integrado 555. Adicionalmente al utilizar el sensor el sistema muestra mayor inmunidad a la interferencia de la luz del ambiente.

En el montaje de los componentes es crucial que el LED infrarrojo (MLED81) este apuntando directamente al centro del sensor infrarrojo (IS471F) para que la recepción de la señal sea la correcta. Adicionalmente es necesario enviar la salida del circuito integrado a una compuerta lógica NOT (74LS04) de forma que la salida del integrado mientras no este sensando sea 5 V y al pasar por la compuerta lógica NOT se convierta en 0 V. El detalle de las especificaciones técnicas de la compuerta se encuentra en Ref. [9]. Por otro lado entre el transistor y el diodo infrarrojo se debe colocar un trimer (R1) para que varíe la caída de potencial y por consiguiente la intensidad del haz de luz que el diodo emite. El diodo LED1 es utilizado simplemente como una señal luminosa que permite visualizar que se inicia y finaliza el conteo por parte del cronómetro. Para mayor detalle de la construcción del prototipo consultar Ref. [5] y Fig. 2.

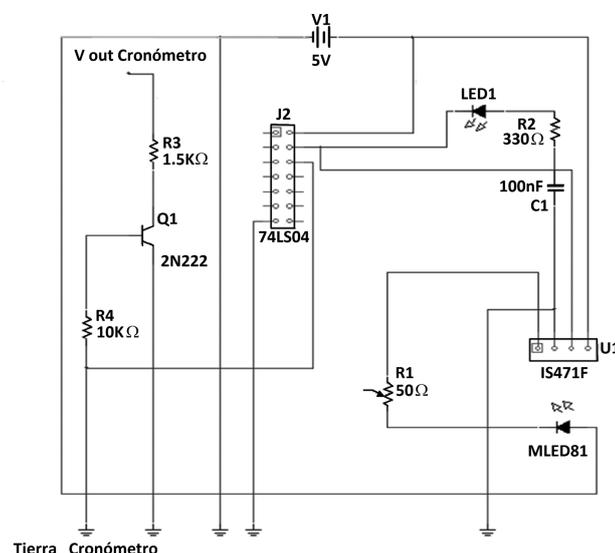


Figure 2 - Circuito de las fotoceldas.

### 4. Uso del temporizador a nivel de enseñanza

El uso del prototipo se extiende a laboratorios de mecánica y algunos proyectos desarrollados por estudiantes como se indica en Ref. [10]. A continuación se hace una descripción más específica de cada uno de los laboratorios donde se usa el prototipo. En Ref. [11, 12] se puede encontrar una descripción más detallada de los experimentos que a continuación son descritos. Durante la experimentación con el prototipo los cuerpos deben ser arrojados aproximadamente 1 mm antes de la primera fotocelda. Se utilizó un valor de gravedad constante de  $g_{teo} = 9.80 \text{ m/s}^2$  el cual es apropiado para Bogotá. Las incertidumbres absolutas de tiempo, longitud y masa de acuerdo a los instrumentos empleados son respectivamente  $\pm 0.01 \text{ s}$ ,  $\pm 1 \text{ mm}$  y  $\pm 0.1 \text{ g}$ .

### 4.1. Cinemática traslacional

Utilizando el riel en forma vertical (Fig. 3), se puede medir el tiempo  $t$  que emplea una esfera metálica en desplazarse verticalmente una distancia fija entre las fotoceldas ( $\Delta y = 0.300$  m). Por medio de la ecuación (1).

$$y = y_o + v_o \cdot t - \frac{1}{2}gt^2. \quad (1)$$

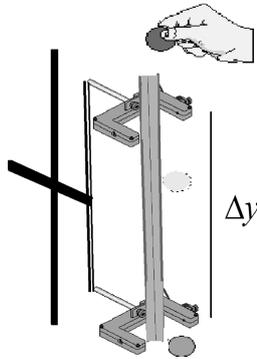


Figure 3 - Montaje para caída libre.

Después de un proceso algebraico de la ecuación (1) y teniendo presente las condiciones iniciales del fenómeno, posición inicial  $y_o = 0$  y velocidad inicial  $v_o=0$ , es posible determinar la gravedad experimental por la ecuación (2)

$$g_{\text{exp}} = \frac{2 \cdot \Delta y}{t^2}. \quad (2)$$

Se realizaron 5 observaciones experimentales y se obtuvo un valor promedio de la gravedad experimental  $g_{\text{exp}} = 9.51$  m/s<sup>2</sup> con desviación estándar  $\sigma_{g_{\text{exp}}} = 0.96$  m/s<sup>2</sup>.

Por medio de la ecuación (3) se determinó el error relativo respecto al valor teórico de gravedad y se obtuvo un valor de 2.98%

$$\%E = \left| \frac{t_{\text{eo}} - \text{exp}}{t_{\text{eo}}} \right| \cdot 100\%. \quad (3)$$

### 4.2. Dinámica traslacional

El temporizador puede ser involucrado dentro de un montaje experimental que permita validar la segunda ley de Newton en ausencia de fricción y sin tener en cuenta la fuerza que ejerce la polea. La aceleración teórica para el sistema físico de la Fig. 4 según la dinámica se define por la ecuación (4)

$$a_{\text{teo}} = \frac{m_c \cdot g}{m_c + m_o}. \quad (4)$$

Se realizaron 5 observaciones experimentales empleando una masa colgante  $m_c = 0.0500$  kg y carro con masa  $m_o = 0.4900$  kg. Usando la ecuación (5)

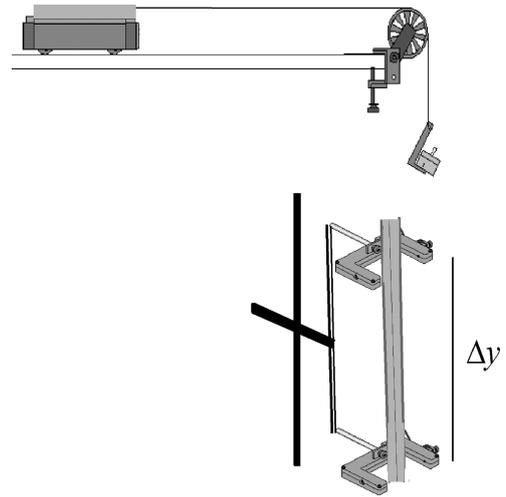


Figure 4 - Montaje para segunda ley de Newton.

$$a_{\text{exp}} = \frac{2 \cdot \Delta y}{t^2}. \quad (5)$$

Para una distancia fija entre las fotoceldas ( $\Delta y = 0.300$  m) se obtuvo una aceleración experimental promedio  $a_{\text{exp}} = 0.87$  m/s<sup>2</sup> con desviación estándar  $\sigma_{a_{\text{exp}}} = 0.02$  m/s<sup>2</sup>. Para este caso  $t$  que corresponde al tiempo que emplea la masa colgante  $m_c$  en desplazarse entre las fotoceldas. Finalmente por medio de la ecuaciones (3), (4) y (5) se obtuvo el error porcentual respecto al valor teórico de aceleración ( $a_{\text{teo}} = 0.91$  m/s<sup>2</sup>), y se determinó un error relativo del 4.37%.

### 4.3. Conservación de la energía mecánica

El temporizador es usado a nivel del teorema de conservación de energía mecánica en ausencia de fricción. Utilizamos el montaje indicado en la Fig. 5, donde analizando el fenómeno de rodadura sin deslizamiento de una esfera de masa  $m$ . La esfera pasa entre las dos fotoceldas y con base en las condiciones iniciales y finales del fenómeno tenemos que la velocidad lineal de la esfera es  $v_o = 0$ , la velocidad angular inicial es  $w_o = 0$  y la altura final que alcanza la esfera es  $h_f = 0$ .

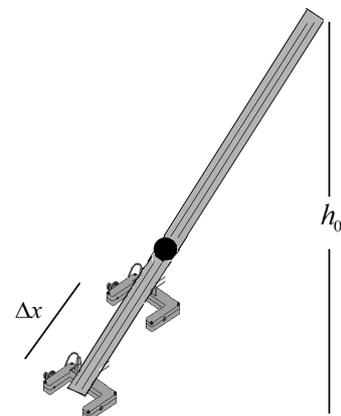


Figure 5 - Montaje para plano inclinado.

Por lo tanto de la ecuación de conservación de energía tenemos que

$$m \cdot g \cdot h_o = \frac{1}{2} m \cdot v_f^2 + \frac{1}{2} I \cdot w_f^2, \quad (6)$$

donde  $v_f$  es la velocidad final de esfera,  $w_f$  es la velocidad angular final y  $h_o$  corresponde a la altura inicial de donde parte la esfera. Recordando que para una esfera de masa  $m$  y radio  $R$  el momento de inercia  $I$  respecto a su centro de masa se define por la ecuación (7)

$$I = \frac{2}{5} \cdot m \cdot R^2. \quad (7)$$

La velocidad angular  $w_f$  se define por la ecuación (8)

$$v_f = w_f \cdot R. \quad (8)$$

Reemplazando la ecuación (7) y (8) en la ecuación (6) y despejando  $v_f$  se obtiene la ecuación para velocidad final teórica (9)

$$v_{f_{teo}} = \sqrt{\frac{10 \cdot g \cdot h_o}{7}}. \quad (9)$$

Se realizaron 5 observaciones experimentales empleando una altura inicial  $h_o = 0.100$  m. Para determinar la velocidad instantánea experimental utilizamos la ecuación (10) y una separación entre las fotoceldas de  $\Delta x = 0.014$  m

$$V_{exp} = \frac{\Delta x}{t}. \quad (10)$$

Se obtuvo una velocidad experimental promedio  $V_{exp} = 1.12$  m/s con desviación estándar  $\sigma_{V_{exp}} = 0.38$  m/s. Para este caso  $t$  que corresponde al tiempo que emplea la esfera en desplazarse entre las fotoceldas. Por medio de la ecuación (3), (9) y (10) se obtuvo el error relativo respecto al valor teórico de velocidad ( $v_{f_{teo}} = 1.18$  m/s), obteniendo un valor de 5.34%.

#### 4.4. Dinámica rotacional

El temporizador se usa para medir el momento de inercia de un disco de radio  $R$  en un sistema rotatorio como el que se indica en la (Fig. 6). En este experimento se desprecia la masa de la polea y el momento de inercia de la misma.

Con base en la segunda ley de Newton el momento de inercia experimental para el disco se define por la ecuación (11)

$$I_{exp} = m \cdot r^2 \left( \frac{g}{a} - 1 \right), \quad (11)$$

donde  $m$  corresponde a la masa colgante,  $r$  es el radio del sistema rotatorio donde se amarra la cuerda y  $a$  es la aceleración que experimenta de la masa  $m$  y que se determina por la ecuación (5). La deducción completa de la ecuación (11) se encuentra en [10]. A nivel teórico el momento de inercia  $I_{teo}$  de un disco de masa

$M$  y radio  $R$  respecto al centro de masa se define por la ecuación (12)

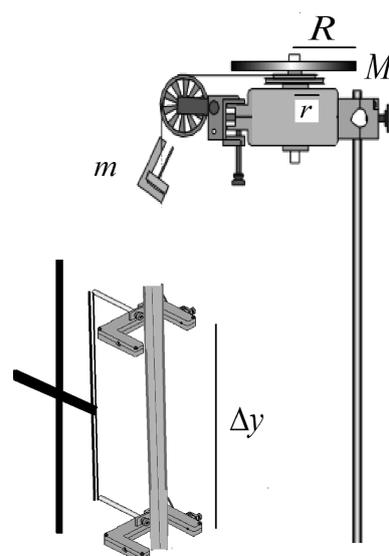


Figure 6 - Montaje para dinámica rotacional.

$$I_{teo} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot R^2. \quad (12)$$

A nivel experimental se realizaron 5 observaciones empleando una masa colgante  $m = 0.0500$  kg, un radio del sistema rotatorio  $r = 0.005$  m, un disco de masa  $M = 0.1000$  kg y radio  $R = 0.150$  m. Se obtuvo el momento de inercia experimental promedio  $I_{exp} = 1.03 \times 10^{-3}$  kg.m<sup>2</sup> con desviación estándar  $\sigma_{I_{exp}} = 0.0037 \times 10^{-3}$  kg.m<sup>2</sup>. Por medio de la ecuaciones (3), (11) y (12) se obtuvo el error relativo respecto al valor teórico de momento de Inercia ( $I_{teo} = 1.12 \times 10^{-3}$  kg.m<sup>2</sup>), obteniendo un error relativo de 8.05%.

## 5. Conclusiones

El prototipo ofrece la posibilidad de ser utilizado en diversos experimentos de la mecánica a nivel de cinemática y dinámica. El temporizador es económico y de fácil implementación a nivel mecánico y electrónico; permite medir con precisión eventos en el orden de las centésimas de segundo. Los errores relativos menores al 10% y presentados en cada uno de los montajes experimentales muestran que el temporizador es adecuado para la experimentación y enseñanza de la mecánica a nivel de bachillerato y universidad.

## Referencias

- [1] F.C. Peterson, American Journal of Physics **51**, 602 (1983).
- [2] P.A. Dorado, L.F. Idrobo, M. Patiño y F. Racedo, Revista Colombiana de Física **38**, 695 (1996).

- [3] S. Calderón, P. Núñez y S. Gil, *Lat. Am. J. Phys. Educ.* **3**, 87 (2009).
- [4] S. Gil, H. D. Reisin y E. Rodríguez, *Am. J. Phys.* **74**, 768 (2006).
- [5] C.A. Collazos, *Lat. Am. J. Phys. Educ.* **4**, 840 (2010).
- [6] Data Sheet (MLED 81): <http://doc.chipfind.ru/motorola/mled81.htm>, consultado el 30/3/2012.
- [7] Data Sheet (2N2222): <http://www.2n2222datasheet.com/>, consultado el 30/3/2012.
- [8] Data Sheet (IS471F1): <http://www.sigmaelectronica.net/manuals/IS471F.pdf>, consultado el 30/3/2012.
- [9] Data Sheet (74LS04): <http://www.alldatasheet.com/datasheetpdf/pdf/27371/TI/SN74LS04DBR.html>, consultado el 30/3/2012.
- [10] C.A. Collazos, *Lat. Am. J. Phys. Educ.* **3**, 446 (2009).
- [11] H.R. Otero y J. Santillana, *Prácticas de Física, Mecánica y Calor* (Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, 2003).
- [12] A. Osorio y C.A. Collazos, *Laboratorio de Física, Mecánica* (Universidad de la Sabana, Bogotá, 2005).