

Desarrollo de un sistema para medir tiempos en experimentos de movimiento rectilíneo

R.G. Camero-Berrones^a, M. Zapata-Torres^a, O. Calzadilla-Amaya^b, J. Guillen Rodríguez^c, y J. Laría-Menchaca^d

^a Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional
Calzada Legaria No. 694, Col. Irrigación, México, D.F. 11500, México,
e-mail: gabriela_camero@hotmail.com; martin_zapata@hotmail.com

^b Facultad de Física, Universidad de La Habana,
San Lázaro y L. 10400, La Habana, Cuba.

^c Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Campus Tampico,
Boulevard Petrocel Km. 1.3 Puerto Industrial, Altamira, Tamaulipas, México, 89600, México.

^d Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Tamaulipas,
Campus Tampico, Tampico, Tamaulipas, México.

Recibido el 28 de noviembre de 2011; aceptado el 23 de enero de 2012

Se desarrolló un sistema para medir tiempos en experimentos de movimiento rectilíneo. Este sistema utiliza foto compuertas, como sensores, y una tarjeta de sonido de la computadora para la adquisición de datos. Los sensores de movimiento fueron comunicados con la computadora mediante un arreglo compuertas lógicas XOR y la señal proveniente de los sensores fue adquirida por medio de la interfaz de entrada de la tarjeta de sonido. Para la habilitación de la tarjeta de sonido y el procesamiento de los datos, se utilizó el software de MATLAB. El sistema desarrollado puede construirse con componentes económicos, y fue utilizado en dos experimentos para verificar su funcionamiento, mostrando aproximaciones cercanas a los modelos teóricos.

Descriptores: Computadoras en educación; teoría del aprendizaje; laboratorio de física en escuela secundaria.

It was developed a system to measure times using photo gates and a computer's sound card on rectilinear motion experiments. The movement sensors were connected to the computer through a XOR logic gate array, the signal from the sensors was fed to the computer's sound card input line. MATLAB was used to acquire and processing data and a specialized add-on software activated the hardware to read the signals produced by the photo gates. The system developed can be built with low cost items and it was tested with two different setup to evaluate and compare theoretical versus experimental data resulting in good agreement.

Keywords: Computer education; learning theory; physics laboratory in high school.

PACS: 01.50.Lc.; 01.40.Ha.; 01.30.Ia.

1. Introducción

Uno de los problemas con la enseñanza de la física es la falta de recursos didácticos e infraestructura que permita la realización de actividades que promuevan la clarificación de conceptos, la experimentación y el modelado, tanto a nivel básico como superior. La importancia de este tipo de actividades radica en que ayudan al estudiante a comprender, reelaborar y afianzar conceptos fundamentales, desarrollan destrezas, habilidades procedimentales y permiten poner en práctica el método científico para resolver problemas a través del planteamiento de una hipótesis y su validación [1,2]. Los laboratorios de Física para el estudio del movimiento y otros temas de mecánica generalmente utilizan un riel de aire, un móvil montado sobre el mismo, un cronómetro, un juego de masas, y la disponibilidad del usuario para la toma de datos, esto último afecta las mediciones, específicamente por el juicio del observador que realiza la medición de manera imprecisa [3].

Los laboratorios asistidos por computadora posibilitan el estudio de fenómenos que difícilmente pueden ser observables y/o medibles, a la vez que reducen tiempos al muestrear, procesar, analizar y modelar datos. La automatización en la

toma de datos, en general, requerirá de una tarjeta de adquisición, detectores de luz o sensores de movimiento y transductores apropiados, aunque muchas compañías (Vernier, Pasco, etc.) proveen estos sensores con conectores y software, su costo de adquisición y mantenimiento es alto en comparación a los presupuestos de los centros escolares.

Las foto compuertas son probablemente los detectores de movimiento más frecuentemente utilizados en experimentos de mecánica [4]. Estas pueden ser utilizadas para detectar el tiempo de varios eventos en forma precisa, son fáciles de usar y emplean un principio de funcionamiento lo suficientemente simple, de tal forma que permiten al estudiante entender con facilidad el fenómeno estudiado. A pesar de que hay instrumentos que miden en forma directa el desplazamiento, velocidad y aceleración, el menor costo y simplicidad hacen que las foto compuertas sean más populares en los diversos niveles de enseñanza.

La tarjeta de sonido de una computadora personal (TSPC) está siendo utilizada como una herramienta para la adquisición de datos; lo cual ha sido empleado con fines educativos o bien para desarrollar instrumentación simple y barata. Entre las diferentes aplicaciones se han desarrollado sensores potenciales [5], base de datos de señales cardíacas [6],

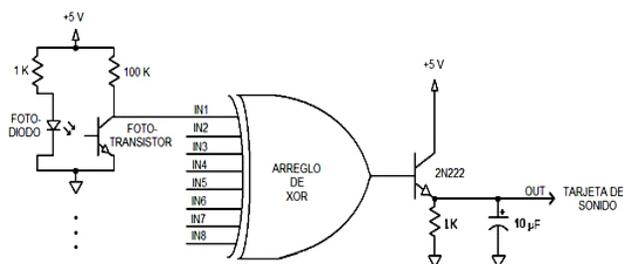


FIGURA 1. Diagrama de la configuración de la interfaz del sistema de adquisición de datos.

un audiómetro [7], experimentos en circuitos y comunicación [8], procesamiento en tiempo real [9] y la demostración experimental del efecto Doppler [10], entre otros.

En el presente trabajo se desarrolló un sistema de adquisición de datos para determinar los tiempos que tarda un móvil en recorrer ciertas distancias. Para lo anterior se construyó un sistema de sensores de movimiento, y una interfaz simple para comunicar los sensores con la computadora. La señal proveniente de los sensores fue adquirida por medio del puerto de entrada de la tarjeta de sonido, y fue desarrollado un programa en MATLAB para la habilitación de la tarjeta de sonido y el procesamiento de los datos. La operación de este sistema fue comprobado a través de dos experimentos para verificar su funcionamiento.

2. Desarrollo del sistema de adquisición de datos

El desarrollo del sistema completo de adquisición de datos se puede dividir en 3 partes: a) Sensores, b) Interfaz y c) software

- a) **Sensores.** Se construyeron ocho opto-interruptores de bajo costo para detectar la presencia del móvil a partir de un fotodiodo emisor IR333C, de alta intensidad radiante (longitud de onda pico $\lambda=940$ nm y ángulo de 20°), éste emite una señal infrarrojo (IR); la cual es recibida por un fototransistor PT331C (tiempo de conmutación $=15 \mu s$). Cuando un objeto (móvil) atraviesa la distancia de separación del emisor y el receptor, la luz IR es bloqueada por el móvil, por lo que el receptor deja de recibir la señal. Mediante la transición lógica se genera un pulso cuya duración es equivalente al tiempo que el móvil bloquea el paso de luz. Este proceso es repetido para cada sensor, generándose en cada caso un pulso. La luz externa puede afectar el funcionamiento de los sensores, por lo que estos fueron colocados en cajas de plástico negras.
- b) **Interfaz.** Un arreglo de compuertas lógicas XOR, recibe las ocho señales provenientes de cada sensor para generar un tren de pulsos, éste es enviado a la tarjeta de sonido de una computadora. La elección de este tipo de arreglo asume que en ningún momento el móvil

atravesara simultáneamente dos sensores. La salida generada de este modo es un tren de pulsos rectangulares, un transistor conectado como emisor común permite el acoplamiento de la señal digital con la entrada analógica de la tarjeta de sonido. La adquisición de datos a través de la tarjeta de sonido posibilita la adquisición de los datos sin requerir instrumentación adicional, con lo que se reducen drásticamente los costos. En la Fig. 1 se presenta un diagrama de la configuración. El circuito produce pulsos positivos que son aplicados directamente a la entrada de la tarjeta de sonido. La única restricción es que la altura absoluta del pulso este dentro del límite de seguridad máximo de la mayoría de las tarjetas de sonido, que corresponde a 1 V (que se obtuvo agregando un divisor de voltaje), ya que una tarjeta de sonido puede fácilmente detectar un pulso de aprox. 20 mV.

- c) **Software.** El programa en Matlab se encarga de habilitar el muestreo a través de la tarjeta de sonido y procesa la señal para determinar los tiempos (el código completo se encuentra en el anexo 1). Para la adquisición de datos el programa en Matlab se encarga de inicializar los parámetros y habilitar la tarjeta de sonido para adquirir la señal, en este proceso se utiliza una rutina de la librería Data Acquisition Toolbox. Debido a que el sonido requiere frecuencias de muestreo de por lo menos 8000 muestras por segundo, el número total de muestras es muy alto. El programa ofrece la opción de seleccionar el número de segundos que durará el muestreo y si se desea reducir el número de muestras. Aunque el inicio del muestreo puede ser de forma inmediata o manual, en este caso se optó porque el programa se encargue de esta tarea, siendo la condición de disparo que la amplitud de la señal sea menor de -0.05 volts, es decir, el sistema empieza a registrar los datos muestreados cuando se cumple la condición de disparo establecida, y que en la práctica coincide con la activación del primer sensor. De este modo el tiempo inicial (t_1) coincide aproximadamente con los 0 s. Para encontrar los tiempos se realiza un análisis de los pulsos, cuya duración equivale al tiempo que esta el móvil frente al sensor. Como puede apreciarse en la Fig. 2a, la forma de los pulsos que llega a la computadora, puede ser irregular, y en ocasiones puede contener señales parásitas (ruido), por esto se establecieron dos criterios para identificar el inicio de cada pulso, que corresponde al instante en que se activa cada sensor. El primer criterio es que la amplitud de la señal original esté por debajo de cierto límite (valor de referencia), indicando una transición negativa, esto es necesario para excluir cualquier interferencia de ruido. Cabe mencionar aquí que esta interferencia puede disminuir considerablemente dependiendo del cable que transmite la señal. Este límite (valor de referencia) fue colocado en -0.5 volts, de acuerdo a la amplitud inicial de la señal. Todos los valores que cumplan la

condición ($\text{Amplitud} < \text{Valor de referencia}$) dan por salida un 1 lógico, generándose una señal auxiliar de pulsos rectangulares. El segundo criterio es que la señal auxiliar de pulsos rectangulares tenga amplitud 1, en los intervalos que corresponden a la señal negativa que está por debajo del nivel de referencia. Para determinar los tiempos se calcula la pendiente, o la diferencia entre las ordenadas, en la señal auxiliar de pulsos rectangulares. Mediante un ciclo “for” se encuentran los valores que sean mayores a 0.99, es decir, 1 lógico, y que corresponden a los tiempos en que se activa cada sensor, respectivamente. En la Fig. 2 se muestra un ejemplo de la evolución que tiene la señal original (gráfica superior) para obtener el vector de tiempos. Se muestra el empleo de pulsos rectangulares como señal auxiliar para el cálculo de pendientes (gráfica intermedia). El vector de tiempos se genera con todos aquellos tiempos a los que les corresponde una diferencia de ordenadas cuyo valor es igual a 1.

3. Validación del sistema de adquisición de datos

Para validar el sistema desarrollado, se realizó una comparación entre los datos generados por el sistema y los medidos por un osciloscopio (modelo TDS 320 de la marca Textronics) a partir de la señal generada. Los resultados experimentales de la medición de intervalos de tiempo durante el movimiento rectilíneo de un móvil accionado manualmente son presentados en la Tabla I, así como su comparación con los datos medidos con el osciloscopio. La desviación estándar de los valores muestreados respecto a los valores determinados por el osciloscopio es de 0.0095, por lo que se concluye que el sistema de adquisición de datos es confiable para continuar con la etapa de procesamiento de datos.

El sistema desarrollado fue utilizado para determinar la aceleración de la gravedad a partir de la caída libre de un móvil. El montaje experimental es mostrado en la Fig. 3. Para obtener el valor de la gravedad, los sensores se colocaron verticalmente sobre una base de madera prensada, con una separación entre cada sensor de 0.1205 ± 0.0039 m. Con una separación entre el emisor y el receptor de 0.1 m, espacio su-

TABLA I. Comparación de los valores de intervalos de tiempo obtenidos con el osciloscopio y el sistema de adquisición de datos.

Muestra	Δt_{OSC} (s)	Δt_{SAD} (s)
1	0.8578	0.8593
2	0.5680	0.5720
3	0.8213	0.8231
4	1.3116	1.3004
5	0.8387	0.8527
6	0.6789	0.6666
7	0.7361	0.7432

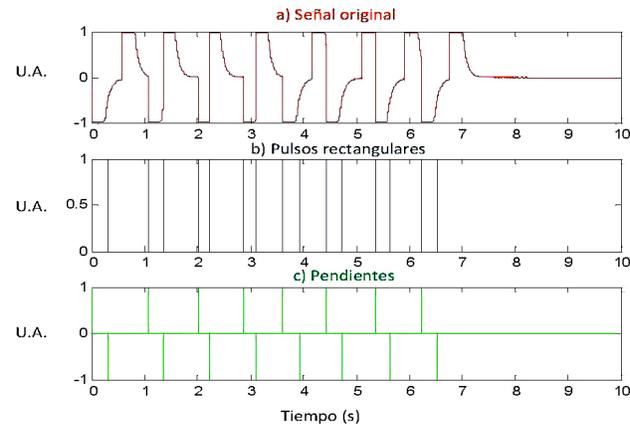


FIGURA 2. Procesado de la señal para la determinación de tiempos.

ficiente para dejar caer una pelota de espuma de 0.035 m de radio. Se hizo un muestreo de 15 repeticiones, dejando caer la pelota desde el sensor superior, cuya posición se consideró idealmente como cero. Se registraron los tiempos arrojados por el programa y se graficó el tiempo versus posición, lo cual es presentado en la Fig. 4. En los gráficos obtenidos se puede observar que el desplazamiento se incrementa de forma cuadrática con el tiempo. Los resultados se ajustaron a una ecuación polinomial de segundo grado, de la forma general:

$$x = A + B_1t + B_2t^2 \tag{1}$$

Al realizarse el ajuste de datos utilizando el método de mínimos cuadrados se obtuvieron las ecuaciones que representan dicho comportamiento. El modelo matemático del fenómeno físico, dado por la ecuación.

$$x = x_0 + v_0t + \frac{1}{2}gt^2 \tag{2}$$

permitió el cálculo de la gravedad para cada caso. El promedio y la desviación estándar para la posición inicial, rapidez inicial y aceleración respectivamente se encuentran en la Tabla II. La aceleración de la gravedad obtenida mediante el procedimiento descrito anteriormente, fue comparada con el valor $g=9.7877$ m/s² de la aceleración en Cd. Madero, Tamaulipas (ciudad al nivel del mar, donde fue hecho el experimento, cuya latitud $\lambda=22^\circ 14'$). Este último valor se obtuvo mediante la fórmula:

$$g=9.780318 \times (1+0.0053024 \sin^2 \lambda - 0.0000059 \sin^2 2\lambda) \text{m/s}^2 \tag{3}$$

TABLA II. Valores de la posición inicial, rapidez inicial y gravedad determinados durante el experimento de caída libre de una pelota.

PARAMETRO	MEDIA	INCERTIDUMBRE	
x_0	-3.49919E-4	6.73812E-4	[m]
v_0	0.117	0.00671	[m/s]
	9.8098	0.01561	[m/s ²]

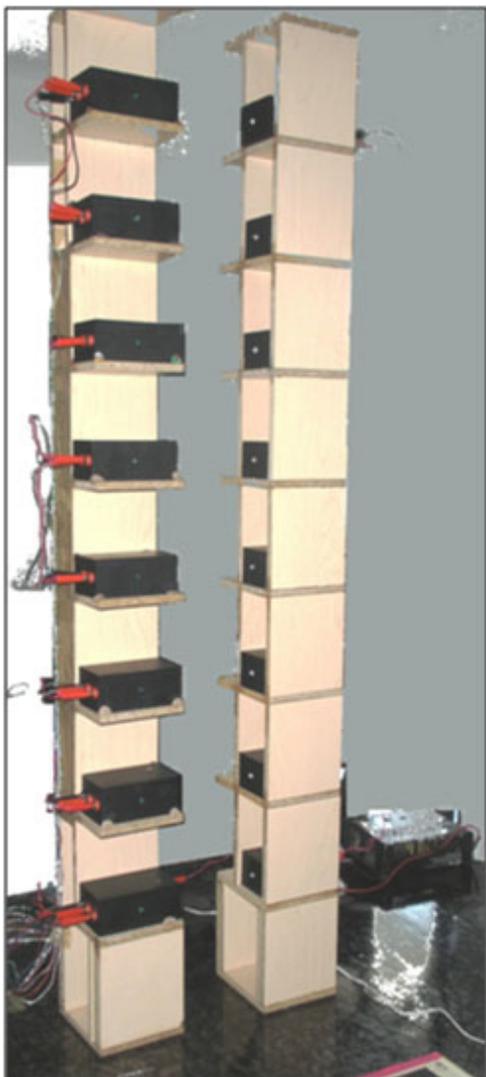


FIGURA 3. El montaje experimental para determinar la aceleración de la gravedad.

Siendo λ la latitud del lugar. Cabe mencionar que esta fórmula es para lugares a nivel del mar y considera la rotación y forma achatada de la Tierra [11]. Por lo que la gravedad obtenida mediante sensores representa un error porcentual de 0.30 %.

El sistema de adquisición desarrollado, también fue utilizado en una práctica de movimiento rectilíneo uniforme. Para ello se construyó un dispositivo que permite aproximarnos a este tipo de movimiento [12], el cual es mostrado en la Fig. 5. Para su construcción se procedió de la siguiente manera: se llenó una manguera transparente con agua coloreada, la cual fue cerrada herméticamente con tapones de hule y silicona; en el interior de la manguera se dejaron aproximadamente 3 cm con aire, con el fin de tener una burbuja dentro de la manguera. Se fijó la manguera a una base utilizando cinchos (abrazaderas). Se verificó que la manguera quedara en línea recta. Se establecieron marcas para medir las distancias entre ellas. Se colocaron los sensores en cada extremo de las marcas y se determinaron los tiempos que tardaba la burbuja

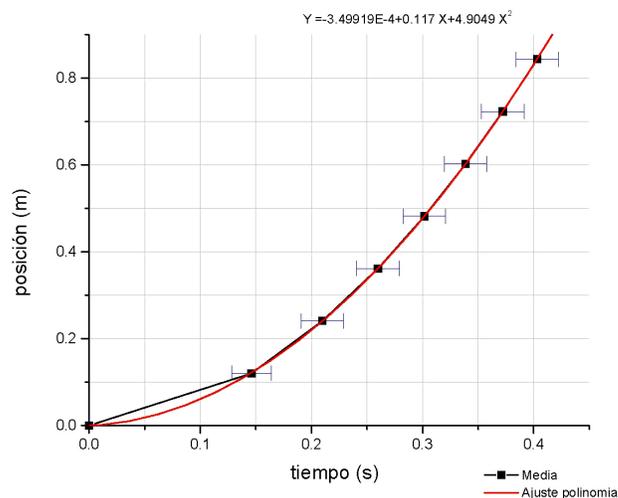


FIGURA 4. La grafica de tiempo vs. posición para cada una de las quince repeticiones en las que se arrojó la pelota para determinar el valor de la gravedad. La línea en azul representa la media y la incertidumbre de los valores.



FIGURA 5. Montaje experimental para el experimento de movimiento rectilíneo uniforme.

TABLA III. Valores de la posición inicial y rapidez inicial de una burbuja de aire que se desplaza dentro de una manguera.

PARAMETRO	MEDIA	INCERTIDUMBRE	
x_o	-0.01813	0.0089	[m]
v_o	0.1394	0.0023	[m/s]

en recorrer la manguera. La base y la manguera se elevaron para formar un ángulo de aprox. 5° debido a dificultades para que la burbuja realizara todo el recorrido. En la Fig. 6 se presenta la gráfica posición contra tiempo, en esta, se puede observar la linealidad de la misma. En la Tabla III se muestran los resultados obtenidos al repetir el experimento quince veces, se grafica la media y la desviación estándar, la cual es menor que en el caso del experimento de la aceleración de la gravedad, con lo cual se puede apreciar que este experimento

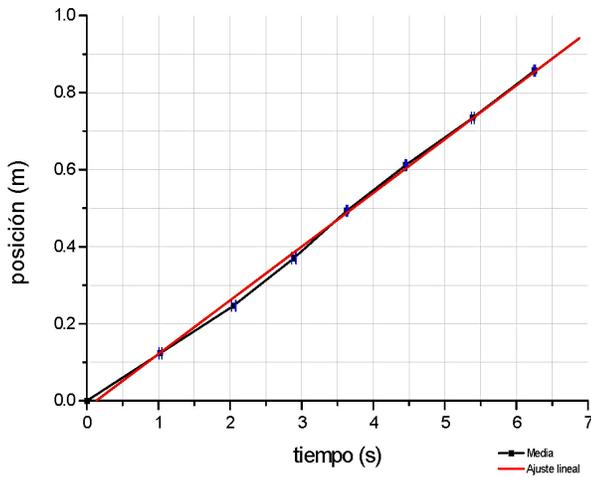


FIGURA 6. La grafica de tiempo vs. posición para cada una de las quince mediciones del desplazamiento de la burbuja.

tiene una mayor repetibilidad. Al realizarse el ajuste de datos utilizando el método de mínimos cuadrados se obtiene la ecuación que representa dicho comportamiento, con un coeficiente de correlación de 0.99913 y una incertidumbre de 0.01348.

4. Conclusiones

Usando una tarjeta de sonido, un sistema de foto compuertas, una interfaz de compuertas lógicas XOR, y un programa en MATLAB, es posible desarrollar instrumentación para medir tiempos en experimentos de movimiento. Esta es una instrumentación de bajo costo y simple de realizar, la cual puede ser susceptible de ser implementada en laboratorios de enseñanza. Los experimentos de movimiento rectilíneo realizados muestran que se pueden realizar mediciones con buena precisión.

Anexo

Código del software desarrollado en MatLab

<code>ai = analoginput('winsound');</code>	Habilita la tarjeta de sonido
<code>ch = addchannel(ai,1);</code>	
<code>set(ai,'Timeout',5);</code>	Tiempo de espera del primer pulso
<code>set(ai,'TriggerChannel',ch(1));</code>	Inicializa canal
<code>set(ai,'TriggerType','Software');</code>	Establece el tipo de disparo
<code>ai.TriggerCondition='Falling';</code>	Establece la condición de disparo
<code>ai.TriggerConditionValue=-0.05;</code>	Establece el valor de disparo
<code>ai.SampleRate =8000;</code>	Muestras por segundo
<code>ai.SamplesPerTrigger = 8000*s1;</code>	Muestras por disparo
<code>start(ai)</code>	Inicia muestreo
<code>[d t]=getdata(ai);</code>	Genera vectores Amplitud y tiempo
<code>dt=[0 0 0 0 0 0 0]</code>	Genera el vector de tiempos
<code>plot (t,d,'r')</code>	Grafica la señal inicial en rojo
<code>hold on</code>	
<code>m2=(d<-0.5)</code>	Genera pulsos rectangulares
<code>A=[t m2]</code>	
<code>plot (t,m2,'b')</code>	Grafica pulsos rectangulares en azul
<code>a=2:1:ai.SamplesPerTrigger</code>	
<code>y(a)=m2(a)-m2(a-1)</code>	Diferencia de ordenadas (pendiente)
<code>c=1</code>	
<code>y1=y'</code>	
<code>for i=1:1:ai.SamplesPerTrigger</code>	Ciclo for, genera vector de tiempos
<code>if (y1(i)>0.99)</code>	Condición
<code>dt(c)=t(i)</code>	
<code>c=c+1</code>	
<code>end</code>	
<code>end</code>	
<code>plot (t,y,'g')</code>	Grafica pendientes

-
1. A. Pontes, *Rev. Eur. Enseñ. Divul. Cien.* **3** (2006) 251.
 2. C. Steidley, *Consortium for computing sciences in colleges* **20** (2005) 200.
 3. P. Padilla Sosa, H.H. Cerecedo-Nuñes, J. Narvaez-Ramirez, F.H. Silva del Rosario y J. Garcia-Guzman, *Rev. Mex. Fis. E* **54** (2008) 208.
 4. R. Dwayne Ramey, *The physics Teacher* **43** (2005) 169.
 5. Sukhen Chandra, Abu Bakar Md. Ismail, *Sensors and Actuators A* **154** (2009) 65.
 6. X. Shouzhong, C. Zehan, Z. Shiyong, F. Li, and F.C. Chong, *Proceedings of the 20th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* **20** (1998) 1210.
 7. Y. Faycal, B. Wahiba, B. Lotfi, B. Ratiba and A. Benia, *International Conference on Advances in Electronics and Microelectronics* (2008) 111.
 8. D. Mehrl and M. Hagler, *28th Annual Frontiers in Education Conference* **3** (1998) 1102.
 9. J. Stensby, *Proceeding 37th Southeastern Symposium on System Theory* (2005) 341.
 10. A. Azooz, *Am. J. Phys* **75** (2007) 184.
 11. http://geophysics.ou.edu/solid_earth/motes/potential/igf.htm
 12. <http://modeling.asu.edu/modeling/ConstVelocityApparatus.pdf>