

Fundamento, diseño y evaluación de un sensor de proximidad ultrasónico con compensación térmica

Fundamentals, Design and Evaluation of an Ultrasonic Proximity Sensor with Thermal Compensation

Ing. Javier A. León-Martínez^{I✉}, Dr.C. Antihus Hernández-Gómez^I, Dr.C. Ciro E. Iglesias-Coronel^{II}

^I Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Facultad de Ciencias Técnicas, San José, Mayabeque, Cuba.

^{II} Universidad Técnica de Manabí (UTM), Facultad de Ingeniería Agrícola, Portoviejo, Manabí, Ecuador.

RESUMEN. Este trabajo se ha propuesto el diseño y la evaluación, en condiciones controladas, de un sistema de medición de proximidad basado en eco localización acústica ultrasónica, para su implementación en sistemas de ingeniería agrícola. Así mismo, se demuestra la relevancia de la dependencia de la velocidad de propagación del sonido con la temperatura del medio. Para ello, fue concebido un experimento ejecutado bajo tres condiciones de temperatura del medio de propagación: 20°C, 30°C y 40°C. El sistema en cuestión fue estudiado en un rango de medición de 60 cm, a intervalos de un centímetro. Con los datos provenientes de la estimación, a partir de las mediciones realizadas, fue efectuado un análisis estadístico en el que se pudo establecer que las colecciones de datos estimados para los tres niveles de temperatura estudiados, presentaron un grado de asociación elevado con la colección de datos de referencia empleada como patrón, con un coeficiente de correlación de Pearson superior a 0,99 en cada caso. Por esta razón se puede afirmar que, en el rango de distancias sometido a estudio, el dispositivo a evaluado posee elevada linealidad (99 %), repetitividad, así como una precisión comparable con la del instrumento empleado como patrón.

Palabras clave: medición de proximidad, ultrasonido, eco localización acústica, temperatura, medio de propagación.

ABSTRACT. The objective of this work was to design and evaluate, under controlled conditions, a proximity measurement system based on ultrasonic acoustic echolocation, for its implementation in agricultural engineering systems. Likewise, the relevance of the sound propagation speed depending on environment temperature is demonstrated. For that reason, the experiment was conceived to be executed under three different conditions of environment temperature of propagation: 20°C, 30°C and 40°C. A range of measurement interval of 60 cm to intervals of a centimeter was studied. With the data coming from the estimate, derived from the measurement carried out, a statistical analysis was made that allowed establishing that estimated data collections at 20°C, 30°C and 40°C, respectively, have a high association grade with the collection of reference data employed as pattern, with a Pearson correlation coefficient of 0,99 in each case. For this reason, it is possible to affirm that, in the range of distances studied, the device to evaluate is highly linear (99 %), repetitive and it has a precision comparable with that of the instrument used as pattern.

Keywords: proximity measurement, ultrasound, acoustic echolocation, temperature, propagation environment.

✉ Autor para correspondencia: Javier A. León-Martínez. E-mail: jleon@unah.edu.cu

Recibido: 13/10/2017

Aceptado: 14/03/2018

INTRODUCCIÓN

La creciente tendencia a la automatización de los complejos sistemas de producción, requiere de la utilización de componentes que sean capaces de adquirir y transmitir la información relacionada con el proceso productivo. Por ello, los sensores y transductores han de cumplir con estas funcionalidades. Por esta razón ha resultado imprescindible que en las últimas décadas, las tecnologías de medición y control se nutran de componentes cada vez más sofisticados ([Gomez y Lopez, 2009](#)). En el mundo contemporáneo, las tecnologías basadas en el empleo de ondas ultrasónicas son consideradas viables. Por ello, atraen el interés de su aplicación en disímiles campos de la ciencia y la industria ([Gomez y Lopez, 2009](#)).

El ultrasonido no es más que una onda acústica cuya frecuencia está por encima del límite perceptible por el oído humano (en el entorno de 20 kHz). En la naturaleza, algunas especies de animales, tales como delfines y murciélagos, emiten pulsos de sonido de alta frecuencia, utilizando el eco resultante para facilitar la orientación y la búsqueda de presas en la oscuridad. A este fenómeno se le conoce como ecolocalización acústica ([Rincón, 2008](#)).

Para la medición de proximidad, distancia y nivel, se destacan los sensores basados en ecolocalización acústica ultrasónica. Los mismos trabajan libres de fricciones mecánicas y detectan objetos a distancias que van desde pocos centímetros hasta varios metros ([Cuamatzi et al., 2010](#)).

Es de apreciar que existen ventajas potenciales en el empleo de estos sistemas en aplicaciones tales como:

- El almacenamiento de alimentos;
- El control del consumo de combustible;
- La determinación del volumen de agua almacenado en tanques, presas, micropresas y pozos;
- En instrumentos especializados, como los penetrómetros de índice de cono;
- En vehículos agrícolas bajo régimen de navegación autónoma, semiautónoma, o de conducción asistida;
- En robótica aplicada a la automatización de procesos agrícolas y agroindustriales.

En Cuba no se reportan investigaciones acerca del empleo de estos sistemas en el control y manejo de procesos agrícolas. En este trabajo se propone un diseño de un sistema de medición de proximidad basado en ecolocalización acústica ultrasónica; y se exponen los resultados de su evaluación en condiciones controladas, para su futura implementación en sistemas de ingeniería agrícola.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

La determinación de distancia a partir de la detección de eco acústico, se basa en la medición del tiempo que transcurre entre la emisión de un estímulo sonoro y el retorno de su eco ([Texas Instruments, 1989](#); [Vida, 2004](#); [Romero y Peretti, 2017](#)). Por tanto, la distancia entre la fuente sonora y el objeto que provoca el eco será:

$$D = \frac{1}{2} v_s t, m \quad (1)$$

donde:

v_s : velocidad de propagación del sonido, m/s ;

t : intervalo de tiempo transcurrido entre la emisión del sonido y la recepción del eco, s .

Como se puede apreciar en la [ecuación \(1\)](#), la distancia a estimar depende además de la velocidad de propagación de las ondas sonoras. Varios autores ([Resnick y Holliday, 1966](#); [Gran, 1970a](#); [Dixon y Massey, 1972](#); [French, 1974](#); [Álvarez, 1981](#); [Kino, 1987](#); [Díaz-Calvo, 1989](#); [Colectivo de Autores, 1998](#); [Vida, 2004](#)), han señalado que esta última está íntimamente ligada a la temperatura del medio de propagación, lo que se detalla a continuación.

La velocidad de fase o velocidad de propagación de las ondas mecánicas longitudinales en un medio elástico está dada según la ecuación de Newton ([Resnick y Holliday, 1966](#); [Álvarez, 1981](#); [Yavorsk y Detlaf, 1983](#); [Colectivo de Autores, 1998](#)):

$$v_s = \sqrt{\frac{\beta}{\rho}}, m/s \quad (2)$$

donde:

β : módulo de elasticidad del medio, N/m^2 ;

ρ : densidad del medio, kg/m^3 .

En el caso de tratarse de un medio sólido, al módulo de elasticidad del mismo se le conoce como módulo de Young ([Resnick y Holliday, 1966](#)). En un medio líquido o gaseoso, se le denomina módulo de elasticidad volumétrico ([Resnick y Holliday, 1966](#); [Gran, 1970b](#); [Dixon y Massey, 1972](#); [Álvarez, 1981](#); [Yavorsk y Detlaf, 1983](#); [Kino, 1987](#); [Colectivo de Autores, 1998](#)):

$$\beta = -V \frac{\partial P}{\partial V}, N/m^2 \quad (3)$$

donde:

P : presión del medio, N/m^2 ;

V : volumen del medio, m^3 .

Ahora, la propagación de ondas mecánicas longitudinales en los gases provoca que las partículas vibren tan rápidamente, que pueda considerarse de naturaleza adiabática a la secuencia resultante de compresiones y expansiones del medio gaseoso ([Gran, 1970a](#); [Álvarez, 1981](#); [Yavorsk y Detlaf, 1983](#); [Colectivo de Autores, 1998](#)). A partir de esta consideración, y asumiendo que el medio posee un comportamiento similar al de los gases ideales, dado que las transformaciones tienen lugar a presión y temperatura ambiente ([Rougeron, 1977](#); [Faires, 1987](#)); entonces se establece que la dependencia de la velocidad de propagación del sonido en un medio gaseoso y la temperatura del mismo, tiene carácter cuadrático ([Álvarez, 1981](#); [Yavorsk y Detlaf, 1983](#); [Colectivo de Autores, 1998](#)) y su formulación analítica es:

$$v_s = \sqrt{\frac{\gamma R}{M_o}} T, m/s \quad (4)$$

donde:

R : constante universal de los gases, $N \cdot m/mol \cdot K$;

M_o : masa molecular media del medio gaseoso, kg/mol ;

T : temperatura absoluta del medio gaseoso, K .

La [ecuación \(4\)](#) puede plantearse, de manera más sencilla, solamente en función de un par conocido de velocidad de propagación del sonido y temperatura del aire. Así, tomando como referencia la velocidad del sonido a la temperatura de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($273,16\text{ K}$) que según [Gran, \(1970\)](#) es $331,7\text{ m/s}$, la [ecuación \(4\)](#) queda:

$$v_s = v_{so} \sqrt{\frac{T}{T_o}}, m/s \quad (5)$$

Ahora, sustituyendo la [ecuación \(5\)](#) en la [\(1\)](#):

$$D = K_o t \sqrt{T}, m \quad (6)$$

donde:

$$K_o = \frac{v_{so}}{2\sqrt{T_o}} = 10,03\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1/2} \quad (7)$$

Las [ecuaciones \(4\)](#) y [\(5\)](#) expresan claramente que cualquier dispositivo que emplee la velocidad del sonido para estimar otros parámetros, como la distancia ([ecuación \(6\)](#)), debe tener en cuenta la temperatura del medio de propagación.

MÉTODOS

La evaluación del dispositivo fue realizada bajo condiciones controladas, con una humedad relativa del 80% y una presión atmosférica de 100 kPa. La misma se llevó a cabo sobre una superficie a nivel, en un espacio cerrado evitando así la influencia perturbadora de las corrientes de aire y las variaciones de temperatura. Para garantizar una buena reflexión del eco, fue empleada una superficie plana de madera (pino), de forma rectangular ($20 \times 15\text{ cm}$) alineada perpendicularmente al eje de emisión del sensor.

El ciclo de medición del dispositivo propuesto consta de cinco fases:

1. Medición de la temperatura del medio de propagación;
2. Excitación acústica (ultrasónica) del medio de propagación;
3. Detección del eco acústico (ultrasónico);
4. Medición del tiempo de retorno del eco acústico (ultrasónico);
5. Estimación de la distancia a la que se origina el eco a partir de la [ecuación \(6\)](#).

La señal de salida del transductor de temperatura incorporado al sensor de proximidad en estudio, ha sido acondicionada para indicar un rango de temperatura entre 5°C y 55°C , en una señal eléctrica de 0 a 5 V ([Motorola, 1978; Texas Instruments, 1989; Devices, 1999](#)). Para la calibración de este, se empleó como instrumento patrón un termómetro de bulbo con una precisión de 1°C .

Con el propósito de garantizar una zona ciega potencialmente corta, se estableció que la excitación acústica del medio de propagación tenga una duración de 0,5 ms. De igual manera, para garantizar tentativamente un rango de medición de alrededor de 10 m, se tomó como espacio de tiempo máximo para la detección del eco acústico 65 ms. De esta manera, se ajustó el ciclo de medición del dispositivo a 70 ms, garantizando así un tiempo de latencia de al menos 5 ms para el reposo del medio acústico.

Independientemente de que las sondas empleadas para manipular la señal se ultrasonido permiten al sensor medir distancias de hasta el orden de los metros, se procedió a evaluar el dispositivo en un rango de distancias restringido a 60 cm. Ello obedece a que el sensor está concebido fundamentalmente para la medición de distancias de esta magnitud, con una elevada

linealidad e inmunidad a los efectos de las variaciones en la temperatura del medio de propagación. Así mismo, las mediciones fueron realizadas a intervalos de un centímetro, bajo las mismas condiciones de humedad relativa y presión atmosférica, en un medio acústico homogéneo. Este procedimiento fue aplicado en el mismo medio acústico, a tres temperaturas diferentes.

Los valores de temperatura del medio seleccionados fueron de 20°C, 30°C y 40°C, logrados a partir de la irradiación del medio con una lámpara de luz infrarroja de 350 W y 110 V, capaz de emitir un cono de radiación de 60°. La selección de estos valores de temperatura para llevar a cabo el experimento está dada porque se estima que para las aplicaciones potenciales de sensor, la temperatura de trabajo estará en el intervalo de 20°C a 40°C.

Las distancias estimadas a partir del procedimiento descrito anteriormente, fueron agrupadas en tres colecciones de datos, según la temperatura del medio de propagación correspondiente. Cada colección de datos incluye el resultado de la medición del tiempo transcurrido entre la emisión del pulso ultrasónico y la detección de su eco. Luego, a partir de la misma, se determina la distancia estimada en cada caso según la [ecuación \(6\)](#). Para cada experimento se tomaron 40 muestras, o sea se estudió un rango de distancias de hasta 60 cm a intervalos de un centímetro, considerando una zona ciega de 20 cm.

Para obtener la colección de datos de referencia, se empleó como instrumento patrón se empleó una cinta métrica con una precisión de 0,1 cm. Con posterioridad, los datos fueron comparados estadísticamente con la colección de datos de referencia, de donde se comprobó la linealidad y la repetitividad del dispositivo, a partir de la determinación en cada caso del grado de asociación entre las variables estimadas y la variable patrón.

Para el procesamiento, análisis y presentación de los datos obtenidos a partir de los experimentos, se empleó el paquete de *software* Matlab 7.1 *release* 2008b.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Teniendo en cuenta las consideraciones teóricas planteadas, el sistema de medición de proximidad propuesto trae incorporado un transductor de temperatura AD595. Además de un par de transductores ultrasónicos 10CK40R/T para la emisión /recepción de la señal ultrasónica. Para ello, el sistema dispone de los subsistemas para la generación del pulso ultrasónico y la detección del eco que, de manera combinada, permiten medir el tiempo de retorno del mismo. En la [Figura 1](#) se muestra el esquema en bloques del sensor de proximidad ultrasónico diseñado a propósito de estas consideraciones.

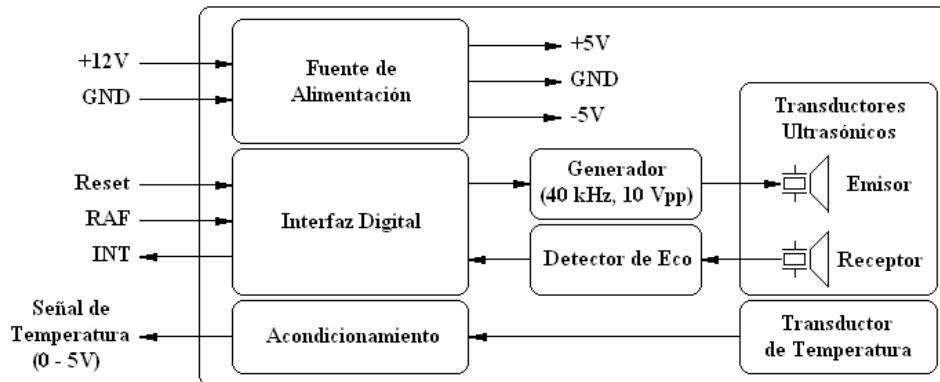


FIGURA 1. Esquema en bloques del sensor de proximidad ultrasónico en estudio

En la [figura 2](#) se muestran gráficamente los resultados obtenidos en el experimento, para las tres condiciones de temperatura del medio (20°C, 30°C y 40°C) previstas en la concepción del mismo.

En la [Tabla 1](#) se muestra el resumen estadístico correspondiente a las mediciones del tiempo de retorno del eco, bajo las tres condiciones de temperatura del medio de propagación previstas. En la misma se aprecia que, para el rango de temperatura del medio estudiado, el coeficiente de variación del tiempo de retorno del eco posee una diferencia que puede llegar a superar el 1,7%. Ello se debe al efecto que tiene sobre el tiempo de retorno del eco, el aumento de la velocidad de propagación del sonido con el aumento de la temperatura del medio.

En la [Tabla 2](#) se puede apreciar el resumen estadístico tanto de los datos de distancia de referencia, como de los obtenidos por la estimación de la distancia, a partir de las mediciones del tiempo de retorno del eco efectuadas bajo las condiciones señaladas. Se puede apreciar que el coeficiente de variación de la distancia estimada, en el rango de temperatura del medio estudiado, difiere en menos de 0,03% de un caso a otro. Esta observación demuestra la conveniencia de tomar en consideración a la medición de la temperatura del medio para la estimación de la distancia, según indica la [ecuación \(6\)](#). Ello permite tener una variabilidad en la distancia estimada 57 veces menor que la obtenida en la medición directa del tiempo de retorno del eco, en el peor de los casos. Esto asegura que el sensor posee una elevada inmunidad ante las variaciones en la temperatura del medio de propagación y, en consecuencia, una elevada repetitividad.

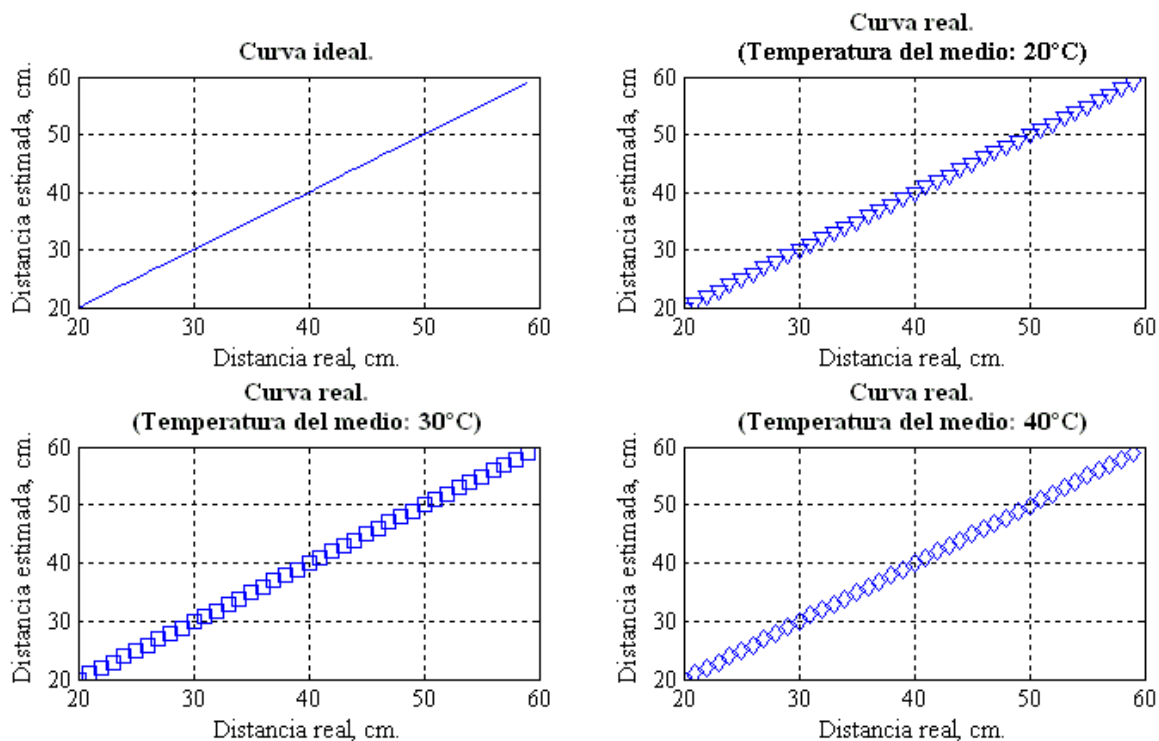


FIGURA 2. Gráficas que relacionan la distancia estimada en cada caso con la distancia real (de referencia).

TABLA 1. Resumen estadístico de las colecciones de datos correspondientes a las mediciones del tiempo de retorno del eco

	20°C	30°C	40°C
Tiempo promedio de retorno del eco, ms.	2,27678	2,25045	2,23223
Desviación Estándar, ms.	0,674806	0,667651	0,661778
Coefficiente de Variación, %.	45,5363	44,5757	43,7950

TABLA 2. Resumen estadístico de las colecciones de datos de distancia estimada a partir de las mediciones del tiempo de retorno del eco efectuadas

Colección de datos	Referencia	20°C	30°C	40°C
Media, cm.	39,5000	39,4313	39,4303	39,4298
Desviación Estándar, cm.	11,6905	11,6872	11,6987	11,69
Coefficiente de Variación, %.	29,5961	29,6395	29,6693	29,6476

Se aprecia además que existe similitud entre las colecciones de datos de distancia estimada. No obstante, para darle un carácter concluyente a este análisis, se determinó el grado de asociación entre la colección de datos de referencia y cada colección de datos de distancia estimada ([Dixon y Massey, 1972](#); [Guerra et al., 2006](#)).

Para establecer el grado de asociación entre la colección de valores de distancia de referencia y la colecciones de valores de distancia estimados en condiciones de temperatura del medio de 20°C, 30°C y 40°C, se realizó un análisis a partir del coeficiente de correlación de Pearson ([Dixon y Massey, 1972](#); [Guerra et al., 2006](#)). Luego, se pudo observar que existe un grado de asociación fuerte entre las distancias estimadas con temperatura del medio de 20°C, 30°C y 40°C y la distancia de referencia, con un coeficiente de correlación en todos los casos de 0,99.

Estos resultados se sustentan sobre la precisión lograda en la base de tiempo del sistema. Contribuye también en este sentido que, al ser relativamente pequeño el rango de medición estudiado (60 cm), se logra una homogeneidad casi perfecta en el medio de propagación.

A partir de este elevado valor del grado de asociación entre las variables sometidas a análisis se puede afirmar que, al menos en el rango de distancias sometido a estudio, el dispositivo a evaluar posee elevada linealidad (99%) y repetitividad, así como una precisión comparable con la del instrumento empleado como patrón.

CONCLUSIONES

Se desarrolló un sensor de proximidad basado en ecolocalización acústica ultrasónica, dotado de capacidad para trabajar bajo condiciones que involucren variaciones de la temperatura del medio de propagación. Se comprobó que los datos de distancia estimados a 20°C, 30°C y 40°C respectivamente, tienen un grado de asociación elevado con los datos de distancia empleados como patrón, con un coeficiente de correlación de Pearson, en todos los casos, de 0,99. En el rango de distancias sometido a estudio, el dispositivo a evaluar posee elevada linealidad (99%) y repetitividad, así como una precisión comparable con la del instrumento empleado como patrón.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁLVAREZ, H.: *Audio*, Ed. Pueblo y Educación, La Habana, Cuba, 1981.

COLECTIVO DE AUTORES: *Oscilaciones y ondas*, Ed. UPC, vol. Fenómenos ondulatorios, Barcelona, España, 107-116 p., 1998.

- CUAMATZI, X.M.A.; JIMÉNEZ, F.; NAVARRETE, J.: *Sistema de proximidad ultrasónico*, [en línea], Instituto Politécnico Nacional Adolfo López Mateo, Tesis en opción al título de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica, México, 2010, Disponible en: www.sepi.esimez.ipn.mx/msistemas/tesis.html, [Consulta: 27 de enero de 2017].
- DEVICES, A.: “Monolithic Thermocouple Amplifiers with Cold Junction Compensation”, *AD594/AD595 Chip, Rev C*, 12, 1999.
- DÍAZ-CALVO, J.: *Electrónica Digital I*, Ed. Pueblo y Educación, vol. Circuitos multivibradores, La Habana, Cuba, 1989.
- DIXON, W.J.; MASSEY, F.: *Introducción al análisis estadístico*, Revolucionaria ed., La Habana, Cuba, 1972.
- FAIRES, V.M.: *Termodinámica*, Ed. Revolucionaria, vol. Procesos con aplicaciones a gases ideales, La Habana, Cuba, pp. 92-127 p., 1987.
- FRENCH, A.P.: *Vibraciones y ondas*, Ed. Reverté, vol. 2, México, 1974.
- GOMEZ, J.; LOPEZ, A.: “Aplicaciones del ultrasonido en el tratamiento de alimentos”, *Temas selectos de Ingeniería de Alimentos*, : 3–1, 2009.
- GRAN, M.F.: *Elementos de Física General y Experimental*, Ed. Ciencia y Técnica, vol. Propagación de los movimientos vibratorios, t. 1, La Habana, Cuba, 1970a.
- GRAN, M.F.: *Elementos de Física General y Experimental*, Ed. Ciencia y Técnica, vol. Acústica, t. 1, La Habana, Cuba, 1970b.
- GUERRA, C.W.; MÉNDEZ, E.; BARRERO, R.; EGAÑA, E.: *Estadística*, Ed. Félix Varela, La Habana, Cuba, 2006, ISBN: 959-258-776-0.
- KINO, G. S.: *Acoustic waves: devices, imaging and analog signal processing*, no. ser. 43 KIN, 1987.
- MOTOROLA: *CMOS Integrated Circuits, Motorola Semiconductors Products Inc., Phoenix*, [en línea], 1978, Disponible en: <https://catalog.hathitrust.org/Record/101967656>, [Consulta: 30 de junio de 2017].
- RESNICK, R.; HOLLIDAY, D.: *Física para estudiantes de Ciencias e Ingeniería*, Ed. Revolucionaria, vol. Ondas sonoras, t. 1, La Habana, Cuba, 1966.
- RINCÓN, J.E.: *Diseño y construcción de un dispositivo electrónico para la detección de obstáculos, como ayuda a personas con discapacidad visual*, [en línea], Universidad de La Salle, Tesis de grado en opción al título de Ingeniero de Diseño y Automatización Electrónica, Bogotá, Colombia, 2008, Disponible en: <https://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/16456/T44.08%20R471d.pdf>, [Consulta: 30 de junio de 2017].
- ROMERO, E.; PERETTI, G.: “Electrónica para laboratorios experimentales de investigación”, 2017.
- ROUGERON, C.: *Aislamiento acústico y térmico en la construcción*, Ed. Reverte, México, 1977.
- TEXAS INSTRUMENTS: *Linear Circuits for Design Engineers Data Book, t. 1*, [en línea], Inst. Texas Instruments Corporation, El Paso, Texas, 1989,

Disponible en: <https://archive.org/details/manuals-texasinstruments>, [Consulta: 10 de enero de 2017].

VIDA, M.J.: *Velocidad del sonido en el aire*, [en línea], 2004, Disponible en: www.ugr.es/~andyk/Docencia/TEB/Guiones/14.doc, [Consulta: 1 de agosto de 2017].

YAVORSK, B.M.; DETLAF, A.: *Prontuario de Física*, Ed. Mir, vol. Velocidad de fase y energía de las ondas elásticas, Moscú, Rusia, pp. 401-405 p., 1983.

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.

Este artículo de se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)