



# Mathematical Modeling and Analytic Characterization of the Performance of an Ultrasound Proximity Sensor

## *Modelación matemática y caracterización analítica del comportamiento de un sensor de proximidad ultrasónico*

Ing. Javier A. León-Martínez<sup>1</sup>, Dr.C. Antihus A. Hernández-Gómez<sup>1</sup>, Dr.C. Ciro E. Iglesias-Coronel<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

<sup>11</sup> Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Manabí, Ecuador.

**ABSTRACT.** This research work is about the mathematical modeling and the analytic characterization of a proximity sensor prototype based on ultrasonic acoustic echolocation with thermal compensation. The analytic characterization of the propagation environment behavior under the acoustic disturbance produced by the sensor is exposed, leaving of a correlation function fitted to the real excitation signal generated by the same one. The influence of the catoptrics conditions of the separation limit between the air and a set of materials in echo intensity is exposed to. Likewise, the sensor response to the echo (considering the worst catoptrics conditions) is analytically characterized.

**Keywords:** ultrasound sensor, acoustic excitation, acoustic reflectivity coefficient, echo intensity.

**RESUMEN.** La investigación aborda la modelación matemática, así como la caracterización analítica, del prototipo de un sensor de proximidad basado en ecolocalización acústica ultrasónica con compensación térmica. Se expone la caracterización analítica del comportamiento del medio de propagación ante la perturbación acústica producida por el sensor, a partir de una función de correlación ajustada a la señal de excitación real generada por el mismo. Se trata además la influencia de las condiciones catóptricas del límite de separación entre el aire y un conjunto de diferentes tipos de materiales, en la intensidad del eco. Así mismo, es caracterizada analíticamente la respuesta del sensor ante el eco, considerando las posibilidades del mismo en el caso en que se evidencia un menor coeficiente de reflectividad acústica (superficie de agua a 100 kPa y 20°C).

**Palabras clave:** sensor ultrasónico, excitación acústica, coeficiente de reflectividad acústica, intensidad del eco.

## INTRODUCTION

The automated measurement of proximity/distance is indispensable to face the growing complexity of a great number of productive systems. In this way the sensors based on ultrasonic acoustic echolocation stand out. A diverse set of authors (Siemens, 2008; Gómez & López, 2009; Montoya, 2013; Domínguez, 2014; Moreno, 2016; Bermudez-Aguirre, 2017) mention that these systems have potential applications in: food storage; control of

## INTRODUCCIÓN

La medición automatizada de proximidad/distancia resulta imprescindible para abordar la creciente complejidad de un gran número de sistemas productivos. En este sentido se destacan los sensores basados en ecolocalización acústica ultrasónica. Diversos autores (Siemens, 2008; Gómez y López, 2009; Montoya, 2013; Domínguez, 2014; Moreno, 2016; Bermudez-Aguirre, 2017), señalan que estos sistemas poseen aplicaciones potenciales en: el almacenamiento de alimentos; el control del consumo de com-

<sup>1</sup> Author for correspondence: Javier A. León-Martínez, e-mail: jleon@unah.edu.cu

Received: 05/12/2019.

Approved: 25/09/2020.

fuel consumption; measurement of structural parameters in roadways networks; determination of the water volume stored in tanks, dams and wells

Specialized instruments; robotics; automation of agricultural and agroindustrial processes and many others.

These systems are viable for reason of some advantages in comparison with other methods of automated measurement of proximity/distance (Siemens, 2008; Cuamatzi *et al.*, 2010; Kentish, 2017), among those are relevant: high immunity to the mechanical vibrations; high immunity to adverse work conditions (environmental noise, dust, gases, others); measurement range that embraces from tenths of centimeters until meters and comparatively low cost.

Likewise, the mathematical modeling of measurements systems has a very important role in the characterization, design and simulation of process control automation (Placko, 2006; Stephan, 2011). For that reason this paper is about the mathematical modeling and the analytic characterization of a proximity sensor prototype based on ultrasonic acoustic echolocation with thermal compensation (see Figure 1), whose fundamentals and design have been treated in precedent works (León-Martínez *et al.*, 2018, 2019).

bustible; la medición de parámetros estructurales en redes viales; la determinación del volumen de agua almacenado en tanques, presas, micropresas y pozos; en instrumentos especializados, como los penetrómetros de índice de cono; en robótica y en la automatización de procesos agrícolas y agroindustriales entre otros.

Esto resulta viable debido a algunas ventajas que marcan la diferencia frente a otros métodos de medición automatizada de proximidad/distancia (Siemens, 2008; Cuamatzi *et al.*, 2010; Kentish, 2017), entre las que resultan relevantes: la elevada inmunidad a las vibraciones mecánicas; la elevada inmunidad a condiciones de trabajo adversas (ruido ambiental, polvo, gases, entre otras); el rango de medición que abarca desde decenas de centímetros hasta metros y el costo comparativamente bajo.

En este sentido, la modelación matemática de sistemas de medición posee un papel muy importante en la caracterización, diseño y simulación de sistemas de control automático de procesos (Placko, 2006; Stephan, 2011). Por ello, en este trabajo es abordada la modelación matemática, así como la caracterización analítica, del prototipo de un sensor de proximidad basado en ecolocalización acústica ultrasónica con compensación térmica (Figura 1), cuya fundamentación y diseño han sido tratados en trabajos precedentes (León-Martínez *et al.*, 2018, 2019).



FIGURE 1. Ultrasound proximity sensor.  
FIGURA 1. Sensor ultrasónico de proximidad.

In this paper the analytic characterization of the propagation environment behavior under the acoustic disturbance produced by the sensor is exposed. The influence of the catoptrics conditions of the separation limit in echo intensity is exposed to. Likewise, the sensor response to the echo is analytically characterized, considering the worst catoptrics conditions studied.

## METHODS

The Figure 2 illustrate a diagram that relates the active components of a measurement system based on echolocation

En este trabajo se expone la caracterización analítica del comportamiento del medio de propagación, ante la perturbación acústica producida por el sensor. Se aborda además la influencia de las condiciones catóptricas del límite de separación en la intensidad del eco. Así mismo, es caracterizada analíticamente la respuesta del sensor ante el eco, considerando las posibilidades del mismo en el caso en que se evidencia un menor coeficiente de reflectividad acústica.

## MÉTODOS

En la Figura 2 se muestra un diagrama que relaciona los componentes activos de un sistema de medición basado en eco-

(the sensor and the data acquisition and control device), as well as their interaction with the passive components that compose the physical environment (the propagation environment and a barrier of a certain material).

localización (el sensor y el dispositivo de control y la adquisición de los datos), así como su interacción con los componentes pasivos que componen el medio físico (el medio de propagación y el obstáculo de un material determinado).

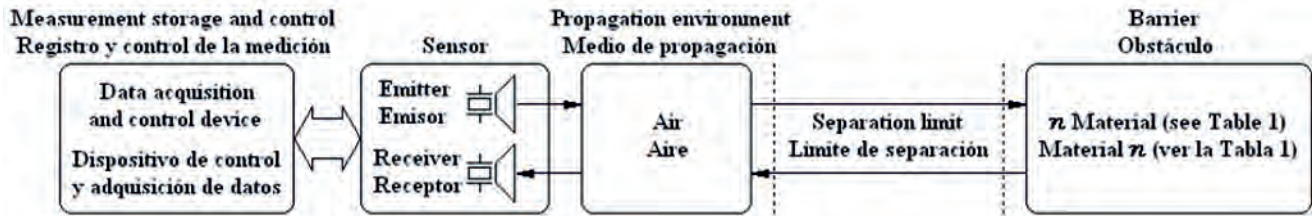


FIGURE 2. Block diagram of the physical principle of measurement by echolocation.  
 FIGURA 2. Diagrama en bloques del principio físico de medición por ecolocalización.

The block diagram of the Figure 2 is a model for the description of the physical principle of measurement/detection by echolocation. The parameters variability that characterize to the passive components of the same one, imposes an appreciable uncertainty rate to the measurement process. Such it is the case of the influence of the temperature of the propagation environment that was treated in a precedent paper (León-Martínez *et al.*, 2018). Nevertheless, it is relevant the estimation of the propagation environment influence in the excitation wave front generated by the sensor. Likewise, it is of interest to know how the variations in the catoptric behavior of the separation limit (between the air and a set of materials), affect the echo signal to be detected by the sensor.

El diagrama en bloques de la Figura 2 constituye un modelo para la descripción del principio físico de medición/detección por ecolocalización. La variabilidad de los parámetros que caracterizan a los componentes pasivos del mismo, impone un grado no despreciable de incertidumbre al proceso de medición. Tal es el caso de la influencia de la temperatura del medio de propagación, aspecto que fue tratado en un trabajo precedente (León-Martínez *et al.*, 2018). No obstante, resulta relevante la estimación de la influencia del medio de propagación en el frente de onda de excitación generado por el sensor. Así mismo, resulta de interés conocer en qué medida ejerce influencia sobre la señal de eco a detectar por el sensor, las posibles variaciones en las condiciones catópticas del límite de separación entre el aire y un conjunto diverso de materiales (ver la Tabla 1).

### Acoustic excitation under the sensor performance conditions

### Excitación acústica del medio bajo las condiciones de trabajo del sensor

The active element of the 10CK40T transducer used in the sensor, is a quartz piezoelectric ultrasonic buzzer. This it acts as a peculiar type of filter on the pulses signal generated by the excitation subsystem of the sensor (León-Martínez *et al.*, 2018). For that reason, the real excitation signal not has a square shape (see blue curve in Figure 3). Thus, in order to facilitate the characterization of their behavior would be convenient to fit it to an analytic correlation function, leaving of the record of the real excitation signal (Zilesny, 2011). Then, it is convenient the employment of the following function:

El elemento activo del transductor 10CK40T, empleado en el sensor, consiste en un resonador piezoeléctrico de cuarzo. El mismo actúa como una especie peculiar de filtro sobre la señal de pulsos generada por el subsistema de excitación del sensor (León-Martínez *et al.*, 2018). Por esta razón, en la práctica la señal de excitación resultante no es exactamente de forma cuadrada (Figura 3). Por ello, en aras de facilitar la caracterización de su comportamiento, resulta conveniente su ajuste a una función analítica de correlación, a partir del registro de la señal de excitación real (Zilesny, 2011). Para conseguir este fin, es pertinente el empleo de la siguiente función:

$$V_{exc}(t) = a[\text{sen}(2\pi f_{exc}t + c) + b \cdot \text{sen}(6\pi f_{exc}t + c)], V \quad (1)$$

$$V_{exc}(t) = a[\text{sen}(2\pi f_{exc}t + c) + b \cdot \text{sen}(6\pi f_{exc}t + c)], V \quad (1)$$

being:

donde:

$a$ : Amplitude of the main harmonic component of  $V_{exc}(t)$  function,  $V$ ;

$a$ : Amplitud de la componente armónica principal de la función,  $V$ ;

$b$ : Non-dimensional relationship among the amplitudes of the main and secondary harmonic components respectively;

$b$ : Relación adimensional entre las amplitudes de la componente armónica principal y la secundaria respectivamente;

$c$ : Phase of  $V_{exc}(t)$  function,  $rad$ ;

$c$ : Fase de la función  $V_{exc}(t)$ ,  $rad$ ;

$f_{exc}$ : Nominal frequency of the transducer,  $Hz$ ;

$f_{exc}$ : Frecuencia nominal del transductor 10CK40T,  $Hz$ ;

$t$ : Time,  $s$ .

$t$ : Tiempo,  $s$ .

The parameters,  $a$ ,  $b$  and  $c$  are the correlation coefficients for the fitting of the function (1) to the real signal generated by the sensor for the transducer excitation.

Los parámetros  $a$ ,  $b$  y  $c$  constituyen los coeficientes de correlación para el ajuste de la función (1) a la señal real generada por el sensor para la excitación del transductor 10CK40T.

The wave function that corresponds to a spherical wave front (Crawford, 1968b; Young & Freedman, 2009; Ginsberg,

La función de onda correspondiente a un frente de onda esférico (Crawford, 1968b; Young y Freedman, 2009; Ginsberg,

2018), generated according to the signal described by the equation (1), is determined for:

$$\psi_{exc}(r, t) = A_{0exc} \frac{r_{0exc}}{r} [\text{sen}(2\pi f_{exc}t - k_{exc}r + c) + \dots \dots + b \cdot \text{sen}(6\pi f_{exc}t - 3k_{exc}r + c)], m \quad (2)$$

where:

$r$ : Wave propagation distance in the instant of time  $t$ ,  $m$ ;

$r_{0exc}$ : Radio of the transducer emission surface,  $m$ .

The wave number of the main harmonic component in the wave function (2), is determined according to:

$$k_{exc} = \frac{2\pi f_{exc}}{v_s}, rad/m \quad (3)$$

being:

$v_s$ : Sound speed in the air,  $m/s$ .

Thus, the oscillations amplitude on the emission surface of the transducer will be:

$$A_{0exc} = \frac{1}{\pi f_{exc}} \sqrt{\frac{I_{0exc}}{2\rho_{air}v_s}}, m \quad (4)$$

where:

$\rho_{air}$ : Density of the air,  $kg/m^3$ .

Leaving of the sensor design conditions, the wave intensity on the emission surface of the transducer can be determined according to:

$$I_{0exc} = I_{ref} \cdot 10^{\left(\frac{\beta_{max}}{10}\right)} \cdot \frac{2 \cdot \max[V_{exc}(t)]}{V_{ppmax}}, W/m^2 \quad (5)$$

being:

$I_{ref}$ : Reference sound intensity,  $10^{-12}W/m^2$ .

$\beta_{max}$ : Maximum sound pressure level of the transducer,  $dB$ ;

$V_{ppmax}$ : Maximum input voltage (peak to peak) of the transducer,  $V$ .

### Dependence between the sensor sensibility and the catoptrics properties of the separation limit

The elastic waves behavior in the separation limit between different densities propagation environments, it is characterized by the separation in two new wave fronts (Yavorski & Pinski, 1983; Young & Freedman, 2009). The same ones are known as reflected (echo) and refracted wave fronts respectively.

The catoptrics properties characterize the wave reflection capacity in the separation limit between two propagation environments. Reflectivity coefficient had defined as the relation between the intensities of the reflected and incident waves, quantifying by this way the separation limit catoptrics properties (Crawford, 1968a; Yavorski & Pinski, 1983). In the particular case of a sonic wave traveling by the air, the acoustic reflectivity coefficient for the associate separation limit to the air and another material, it is calculated according to:

2018), generado a partir de la señal descrita por la ecuación (1), está dada por:

donde:

$r$ : Distancia de propagación de la onda en el instante de tiempo  $t$ ,  $m$ ;

$r_{0exc}$ : Radio de la superficie de emisión del transductor 10CK40T,  $m$ .

El número de onda de la componente armónica principal de la función de onda (2), se determina según:

$$k_{exc} = \frac{2\pi f_{exc}}{v_s}, rad/m \quad (3)$$

siendo:

$v_s$ : Velocidad del sonido en el aire,  $m/s$ .

Así mismo, la amplitud de las oscilaciones en la superficie de emisión del transductor 10CK40T será:

$$A_{0exc} = \frac{1}{\pi f_{exc}} \sqrt{\frac{I_{0exc}}{2\rho_{air}v_s}}, m \quad (4)$$

donde:

$\rho_{air}$ : Densidad del aire,  $kg/m^3$ .

La intensidad de la onda en la superficie de emisión del transductor 10CK40T, dadas las condiciones de diseño del sensor, se determina a partir de:

$$I_{0exc} = I_{ref} \cdot 10^{\left(\frac{\beta_{max}}{10}\right)} \cdot \frac{2 \cdot \max[V_{exc}(t)]}{V_{ppmax}}, W/m^2 \quad (5)$$

donde:

$I_{ref}$ : Intensidad del sonido de referencia,  $10^{-12}W/m^2$ .

$\beta_{max}$ : Nivel de presión sonora máximo del transductor 10CK40T,  $dB$ ;

$V_{ppmax}$ : Voltaje de entrada máximo (pico a pico) del transductor 10CK40T,  $V$ .

### Dependencia entre la sensibilidad del sensor y las propiedades catóptricas del límite de separación

El comportamiento de las ondas elásticas en el límite de separación entre dos medios de propagación de diferentes densidades, se caracteriza por su separación en dos nuevos frentes de onda (Yavorski y Pinski, 1983; Young y Freedman, 2009). A los mismos se les conocen como frentes de onda reflejado y refractado respectivamente.

Las propiedades catóptricas caracterizan la capacidad de reflexión de una onda en el límite de separación de dos medios. Las mismas se cuantifican a partir del coeficiente de reflectividad, el que se define como la relación entre la intensidad de la onda reflejada (eco) y la intensidad de la onda incidente en el límite de separación (Crawford, 1968a; Yavorski y Pinski, 1983). En el caso particular del sonido, considerando el límite de separación entre el aire y otro material, el coeficiente de reflectividad acústica se determina según:



$$R_n = \left( \frac{\rho_{air}v_s - \rho_n v_n}{\rho_{air}v_s + \rho_n v_n} \right)^2 \quad (6)$$

where:

$n$ : Numeric identification associated to the corresponding material (see Table 1);

$\rho_n$ : Density of the corresponding material,  $kg/m^3$ ;

$v_n$ : Sound speed in the corresponding material,  $m/s$ .

The selection of the different materials for the catoptric behavior characterization, it must consider that a high variability exists among the parameters associated to the same ones. The Table 1 has the relation of the materials and their parameters for the equation (6). They have been taken of Young & Freedman (2009).

In the equation (6) it is considered that the energy of the incident wave is completely transferred to the echo and the refraction wave. For that reason, while bigger it is the difference between the respective densities of the material and the air, the echo intensity will also be bigger (Crawford, 1968a; Yavorski y Pinski, 1983; Savéliev, 1984). Then, the echo intensity in the isotropic source emission focus can determine according to:

$$I_e = R_n I_{0exc} \left( \frac{r_{0exc} r_{0e}}{r^2} \right)^2, W/m^2 \quad (7)$$

being:

$r_{0e}$ : Radio of the reflection surface,  $m$ .

## RESULTS AND DISCUSSION

### Behavior of acoustically disturbed environment under the sensor excitation

As a result of the transducer excitation, the real shape of the excitation signal is obtained and record (see blue curve in Figure 3). Leaving of the data set that coming from the real signal registration, a fitted mathematical model is obtained (see red curve in Figure 3).

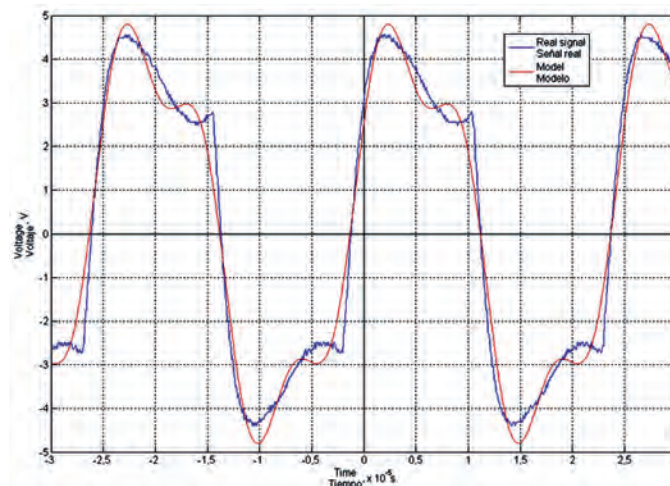


FIGURE 3. Record of sensor excitation signal and its fitted mathematical model.  
 FIGURA 3. Oscilograma de la señal de excitación del sensor y de su modelo matemático ajustado.

$$R_n = \left( \frac{\rho_{air}v_s - \rho_n v_n}{\rho_{air}v_s + \rho_n v_n} \right)^2 \quad (6)$$

donde:

$n$ : Identificación numérica asociada al material correspondiente (Tabla 1);

$\rho_n$ : Densidad del material correspondiente,  $kg/m^3$ ;

$v_n$ : Velocidad del sonido en el material correspondiente,  $m/s$ .

Luego, procede la selección de los diferentes materiales para la caracterización. Para ello, se ha de tomar en consideración que exista una amplia variabilidad entre las densidades de los mismos, así como entre sus respectivas velocidades de propagación del sonido. En la Tabla 1 se relacionan los materiales y los valores numéricos de los parámetros a emplear en la ecuación (6). Los mismos han sido tomados de Young y Freedman (2009), como se ha mencionado anteriormente.

La ecuación (6) se sustenta sobre la consideración de que la energía de la onda incidente en el límite de separación, se consume completamente en la reflexión y la refracción de la misma. Por ello, es de esperar que en la medida en que sea mayor la diferencia entre las densidades del medio correspondiente y del aire, la intensidad del eco también lo será (Crawford, 1968a; Yavorski y Pinski, 1983; Savéliev, 1984). Luego, se puede determinar la intensidad del eco en el foco de emisión de la fuente isótropa según:

$$I_e = R_n I_{0exc} \left( \frac{r_{0exc} r_{0e}}{r^2} \right)^2, W/m^2 \quad (7)$$

donde:

$r_{0e}$ : Radio de la superficie de reflexión,  $m$ .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Comportamiento del medio sometido a excitación acústica por el sensor

Como resultado de la excitación del transductor 10CK40T, se obtiene la forma de onda real de la señal de excitación, cuyo oscilograma se muestra en color azul en la Figura 3. A partir del conjunto de datos que conforman la misma, se obtuvo un modelo matemático ajustado, cuya gráfica se muestra en color rojo en la Figura 3.

The fitted mathematical model of the excitation signal describe it with an adjusted  $R^2$  equal to 98,23%. This model is described analytically by the following function:

$$V_{exc}(t) = 4,425[\text{sen}(2,5133 \times 10^5 \cdot t + 0,4702) + \dots + 0,2705 \text{sen}(7,5399 \times 10^5 \cdot t + 0,4702)], V \quad (8)$$

Leaving of the expression (8) (see the red curve in Figure 3 and the first graph in Figure 4) it is possible to model the behavior of the oscillations in the propagation environment, as well as with the advance of the wave front. So the corresponding wave function is:

El modelo matemático ajustado para la señal de excitación, permite describir a la misma con un  $R^2$  ajustado de 98,23%. Este modelo obedece analíticamente a la siguiente función:

A partir de la expresión (8) (ver la curva de color rojo en la Figura 3 y la primera gráfica de la Figura 4) es posible modelar el comportamiento de las oscilaciones producidas en el medio de propagación, así como el comportamiento de las mismas con el avance del frente de onda. De modo que la función de onda correspondiente es:

$$\psi_{exc}(r, t) = \frac{1,343 \times 10^{-9}}{r} [\text{sen}(2,5133 \times 10^5 \cdot t - 730,6029 \cdot r + 0,4702) + \dots + 0,2705 \cdot \text{sen}(7,5399 \times 10^5 \cdot t - 2191,8087 \cdot r + 0,4702)], m \quad (9)$$

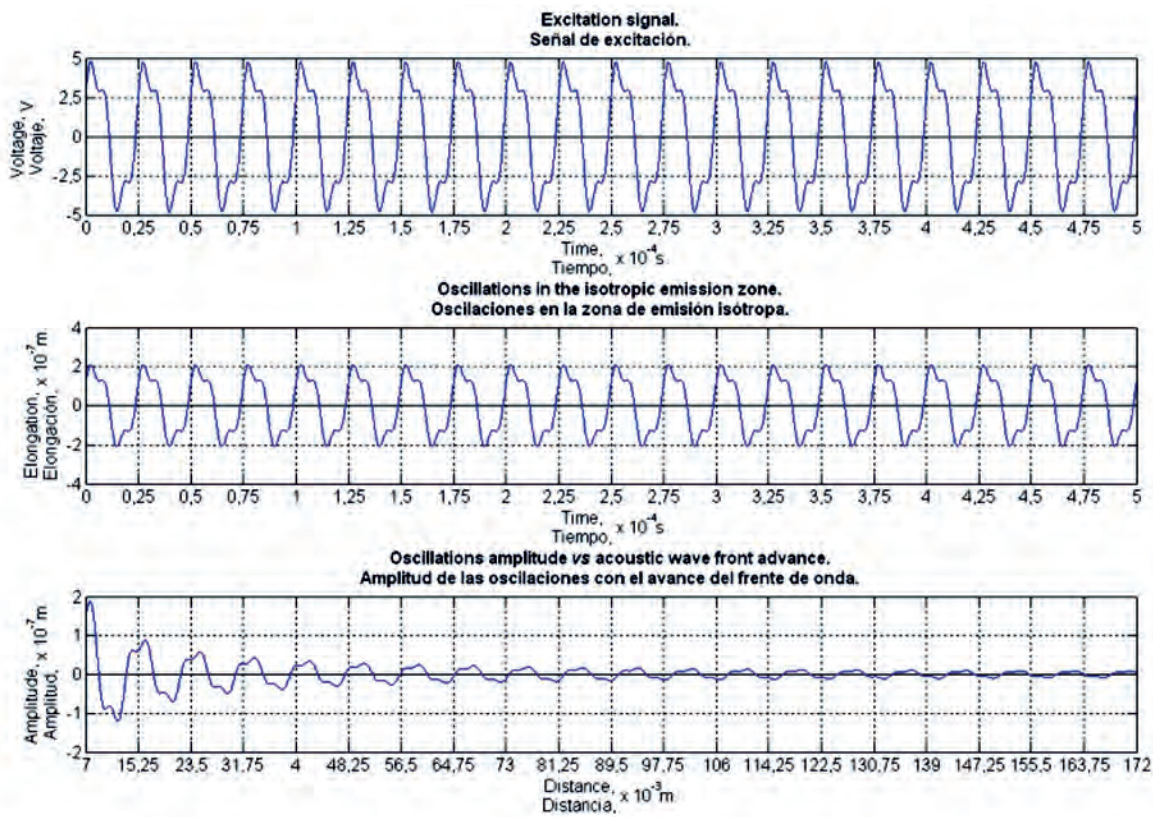


FIGURE 4. Result of the mathematical modeling of the behavior of acoustically disturbed environment under the sensor excitation.  
 FIGURA 4. Resultado de la modelación matemática del comportamiento de la excitación acústica del medio producida por el sensor.

In the second graph in Figure 4 is presented the behavior of the oscillations in the near proximity of the transducer emission surface. Likewise, in the third graph in the Figure 4 is presented the curve that describes the decrease of the oscillations amplitude, with the advance of the wave front.

La segunda gráfica de la Figura 4 ilustra el comportamiento de las oscilaciones alrededor de la superficie de emisión del transductor 10CK40T. Así mismo, en la tercera gráfica de la Figura 4 se muestra la curva que describe la disminución de la amplitud de las oscilaciones, con el avance del frente de onda.

In general, on the graphs of the Figure 4 is presented a mathematical model running of the acoustic excitation taken place on the propagation environment by the sensor action. In them, the behavior of the wave front is described during the time (0,5 ms) that has been programmed for the duration of the environmental acoustical disturbance (León-Martínez *et al.*, 2019).

Los gráficos de la Figura 4 muestran una corrida del modelo matemático de la excitación acústica producida por el sensor sobre el medio de propagación. En ellos se puede apreciar que describen en conjunto el comportamiento del frente de onda durante el tiempo (0,5 ms) que se ha programado para la duración de dicha perturbación (León-Martínez *et al.*, 2019).

### Influence of acoustic reflectivity coefficient in echo formation

In the Table 1 is presented the set of acoustic reflectivity coefficients of the selected materials related to the air (100Pka, 20°C). Then, no matter the deliberate high variability of the sets of densities and sound speeds, in the set of the acoustic reflectivity coefficients it is presented a very small variation (variation coefficient equal to 0,046%).

### Influencia del coeficiente de reflectividad acústica en la formación del eco

En la Tabla 1 se muestran los resultados de la determinación de los coeficientes de reflectividad acústica con relación al aire, de los diferentes materiales seleccionados a partir de los criterios expuestos anteriormente.

**TABLE 1. Acoustic reflectivity coefficients of several materials in relation to the air (100 kPa, 20°C)**

Air Aire	Material (100Pka, 20°C)	Density, Densidad, kg/m <sup>3</sup>	Sound speed, Velocidad del sonido, m/s	Acoustic reflectivity coefficient Coeficiente de reflectividad acústica
<i>n</i>		1,2	344	
1	Water Agua (100Pka, 20°C)	1000	1482	0,99889
2	Aluminum Aluminio	2700	5092	0,99988
3	Steel Acero	7800	5064	0,99996
4	Copper Cobre	8900	5316	0,99995
5	Lead Plomo	11300	1190	0,99988
	Variation coefficient, Coeficiente de variación,	%	68,32	57,48

**Note:** The variation coefficient of the densities and the sound speeds shown, don't contemplate the air density and the sound speed in the air.

**Nota:** Los valores del coeficiente de variación de las densidades y las velocidades del sonido mostrados, no contemplan la densidad y la velocidad del sonido del aire.

The obvious interpretation of this result is that they won't have significant differences in the behavior of the echo intensity resultant of the collision of a sound wave (through the air) with one of these materials. In fact, in the worst of the studied cases (water surface at 100Pka and 20°C) the echo will transport the 99,889% of the incident wave energy, in the zone of the near proximity of the separation limit between the air and the water.

### Echo intensity performance

As it has been mentioned previously, the 10CK40T transducer it is able to produce a sound pressure level of 120 dB for a maximum amplitude of a continuous excitation signal of 20 V (peak to peak) and a frequency of 40 kHz. Nevertheless, the design parameters of the sensor impose an excitation signal for the transducer of 9,04V (peak to peak), as the show in the blue curve of the Figure 3. So, this implies that the initial sound intensity of the sensor will be 0,45 W/m<sup>2</sup>, then it means a sound pressure level in the order of 116 dB.

Considering the elements exposed previously, it is possible to describe the behavior of the echo intensity with the increase of the distance between the sensor and the separation limit, for the worst of the studied cases (water

Como se puede apreciar, a pesar de la variabilidad deliberada entre las densidades y entre las velocidades del sonido correspondientes a los diferentes materiales seleccionados, los respectivos coeficientes de reflectividad acústica varían muy poco entre sí. En efecto, el coeficiente de variación de este conjunto de valores es 0,46%. La interpretación obvia de este resultado es que no existirán diferencias significativas en el comportamiento de la intensidad del eco acústico resultante de la colisión de una onda sonora (que viaje a través del aire) con uno de estos materiales. Ello está relacionado con el hecho de que en el caso en que se evidencia un menor coeficiente de reflectividad acústica (superficie de agua a 100Pka y 20°C) el eco transportará, en el entorno del límite de separación, el de la energía de la onda incidente sobre el mismo.

### Comportamiento de la intensidad del eco

Como se ha mencionado anteriormente, el transductor piezoeléctrico 10CK40T es capaz de producir un nivel de presión sonora de 120 dB para una señal de excitación continua con una amplitud máxima de 20 V pico a pico y una frecuencia de 40 kHz. No obstante, los parámetros de diseño del sensor imponen una señal de excitación para dicha sonda de 9,04V pico a pico (ver la curva de color azul de la Figura 3), lo que implica una intensidad inicial del sonido para el sensor de 0,45 W/m<sup>2</sup>. Luego, se puede estimar que el sensor podrá lograr un nivel de presión sonora del orden de 116 dB.



surface at 100 *Pka* and 20°C, with 0,1 *m* of radio). The curves of the Figure 5 show this relationship, obtained leaving of the equation (7).

A partir de lo antes expuesto, considerando además una superficie de reflexión de 0,1m de radio, así como el material con menor coeficiente de reflectividad acústica registrado en la Tabla 1 (agua a 100*kPa* y 20°C); es posible describir el comportamiento de la intensidad del eco con el aumento de la distancia que existe entre el sensor y el límite de separación. Con ayuda de la ecuación (7), en la Figura 5 se muestra esta relación.

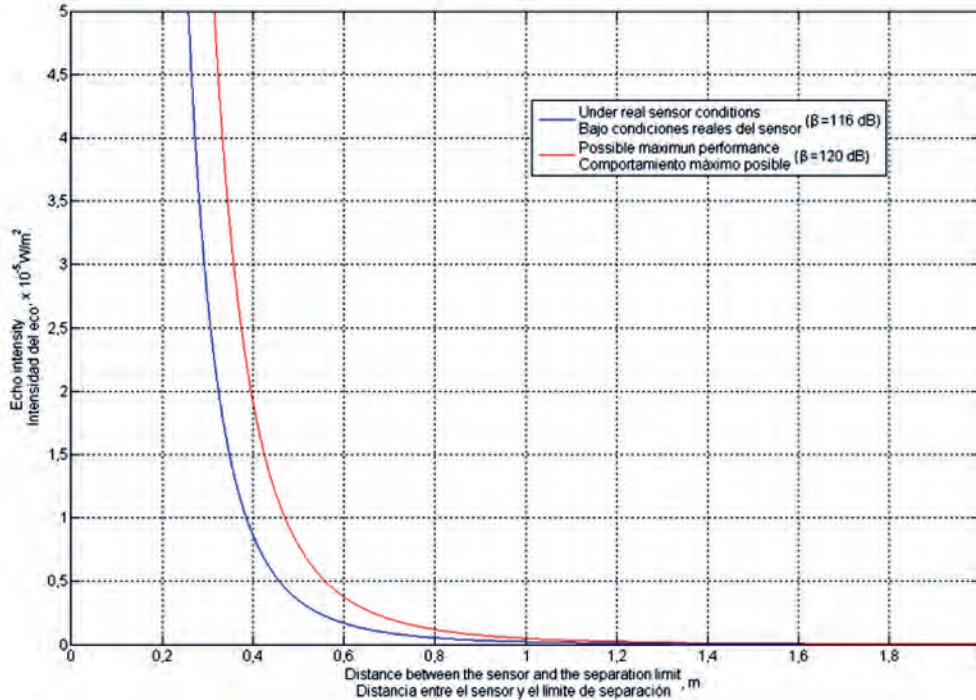


FIGURE 5. Echo intensity performance under the sensor design conditions.  
FIGURA 5. Comportamiento de la intensidad del eco para las condiciones de diseño del sensor.

Thus, it can be predicted that at a distance of two meters between the sensor and the separation limit, the echo intensity will be  $1,38 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$  (echo sound pressure level in the order of 41,4 *dB*). This guarantees a good sensor performance for a detection zone defined between 0,20 and 2 m, considering that the sensibility of the 10CK40R transducer is  $5 \times 10^{-18} \text{ W/m}^2$  (-63*dB*).

## CONCLUSIONS

- It was analytically characterized the behavior of the propagation environment response under the acoustic excitation produced by the sensor action, leaving of a correlation function fitted to the real excitation signal generated by the same one, with an adjusted  $R^2$  equal to 98,23%;
- The catoptrics conditions of the separation limit between air and a materials set (no matter the deliberate high variability of the sets of their physical properties) doesn't have significant influence in the resultant echo intensity, because the variation coefficient of the acoustic reflectivity coefficients set is equal to 0,046 %;
- The analytic characterization of sensor response to the echo (considering the worst catoptrics conditions) indi-

Así mismo, se puede establecer que a una distancia de dos metros entre el sensor y el límite de separación, la intensidad del eco está en el orden de  $1,38 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$ , la que se corresponde con un nivel de presión sonora del eco del orden de los 41,4 *dB*. Ello asegura una buena respuesta del sensor para una zona de detección comprendida entre 0,20 y 2 m; si se considera la sensibilidad que consigna el fabricante para el transductor ultrasónico 10CK40R, que es del orden de  $5 \times 10^{-18} \text{ W/m}^2$  (-63*dB*).

## CONCLUSIONES

- Fue caracterizado analíticamente el comportamiento de la respuesta del medio de propagación ante la excitación acústica producida por el sensor, a partir de una función de correlación ajustada a la señal de excitación real generada por el mismo, la que permite describir a esta última con un  $R^2$  ajustado de 98,23%;
- Se determinó que las condiciones catóptricas del límite de separación entre el aire y un conjunto de materiales con propiedades que difieren significativamente entre sí, no posee una influencia significativa en la intensidad del eco resultante, pues el coeficiente de variación del conjunto de coeficientes de reflectividad acústica obtenido, es de 0,046 %;
- La caracterización analítica de la respuesta del sensor ante el eco, considerando las posibilidades del mismo en el caso en que se



cates that the sensor must have a good performance for a detection zone defined between 0,20 and 2m, considering that the minimum sound pressure level of the echo is in the order of 41,4 dB.

evidencia un menor coeficiente de reflectividad acústica (superficie de agua a 100 Pka y 20°C), indica que ha de tener una buena respuesta en el rango comprendido entre 0,20 y 2m, dado que el nivel de presión sonora mínimo del eco es del orden de los 41,4 dB.

## REFERENCES

- BERMUDEZ-AGUIRRE, A. D. (Ed.): *Ultrasound: Advances in food processing and preservation*, Ed. Elsevier Inc., Oxford, U K, 2017, ISBN: 978-0-12-804581-7.
- CRAWFORD, F. S.: "Reflection", en *Waves. Berkeley Physics Course*, Ed. McGraw-Hill Book Company, vol. 3, New York, USA, pp. 226-240, 1968a.
- CRAWFORD, F. S.: "Traveling Waves", en *Waves. Berkeley Physics Course*, Ed. McGraw-Hill Book Company, vol. 3, New York, USA, pp. 156-199, 1968b.
- CUAMATZI, X.; JIMÉNEZ, M. A.; NAVARRETE, F. 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 D. F., 2010, *Disponible en: www.sepi.esimez.ipn.mx/msistemas/tesis.html*.
- DOMÍNGUEZ, C.: *Evaluación superficial de los pavimentos (IRI, PR, MAC, DET) mediante el uso de equipos de alto rendimiento en diversos tramos de la Red Carretera Federal (Autopistas de Cuota, Corredores y Red Básica Libre)*, Dirección General de Servicios Técnicos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, informe técnico, México D. F., 14 p., 2014.
- GINSBERG, J. H.: "Descriptions of sound", en *Acoustics. A textbook for engineers and physicists*, Ed. Springer International Publishing, vol. I: Fundamentals, Dunwoody, pp. 1-90, 2018, ISBN: 978-3-319-56844-7.
- GÓMEZ, J.; LÓPEZ, A.: *Aplicaciones del ultrasonido en el tratamiento de alimentos, [en línea]*, Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos, Departamento de Ingeniería Química y Alimentos, Universidad de las Américas, Puebla, México, 2009, *Disponible en: www.udlap.mx/WP/tsia/files/No3-Vol-1/TSIA-3(1)-Gomez-Diaz-et-al-2009.pdf, [Consulta: 13 de marzo de 2017]*.
- KENTISH, S. E.: *Engineering principles of ultrasound technology*, en A. D. Bermudez-Aguirre, *Ultrasound: Advances in food processing and preservation*, Ed. Elsevier Inc., Oxford, U K, pp. 1-14, 2017, ISBN: 978-0-12-804581-7.
- LEÓN-MARTÍNEZ, J. A.; HERNÁNDEZ-GÓMEZ, A. A.; IGLESIAS-CORONEL, C. E.: "Fundamentals, Design and Evaluation of an Ultrasonic Proximity Sensor with Thermal Compensation", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 27(2): 33-40, 2018, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- LEÓN-MARTÍNEZ, J. A.; HERNÁNDEZ-GÓMEZ, A. A.; IGLESIAS-CORONEL, C. E.: "Diseño de un Dispositivo de Interfaz para un Sensor Ultrasónico de Proximidad", en *XIII Conferencia Científica de Ingeniería Agrícola AGRING*, Universidad Agraria de La Habana, Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA), San José de Las Lajas, Mayabeque, Cuba, 2019, ISBN: 978-959-16-3777-2.
- MONTOYA, G. J.: *Análisis del IRI para un proyecto de carretera sinuosa concesionada en el Perú*, Universidad de Piura, Tesis (en opción al título de Máster en Ingeniería Civil con mención en Ingeniería Vial), Lima, Perú, 82 p., 2013.
- MORENO, L. J.: *Influencia de la velocidad en la medición de IRI con equipo perfilómetro láser*, Universidad Militar de Nueva Granada, Trabajo de Grado (en opción al título de Especialista en Ingeniería de Pavimento), Bogotá, Colombia, 14 p., 2016.
- PLACKO, D.: *Metrology in Industry: The Key of Quality*, Ed. French College of Metrology, Newport, Gales, UK, 2006, ISBN: 978-1-905209-51-4.
- SAVÉLIEV, I. V.: "Ondas Elásticas", en *Curso de Física General*, Editorial MIR, vol. II, Moscú, Rusia, URSS, pp. 289-316, 1984.
- SIEMENS: "Detectores de proximidad ultrasónicos", en *Sensores para la automatización de la producción*, Siemens AG, Catálogo FS 10, Nürnberg, Germany, pp. 2/3-2/69, 2008.
- STEPHAN, E. P.: *Wriggers: Modelling, Simulation and Software Concepts for Scientific-Technological Problems*, Ed. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2011, ISBN: 978-3-642-20489-0.
- YAVORSKI, B. M.; PINSKI, A. A.: "Ondas Elásticas", en *Fundamentos de Física*, Editorial MIR, vol. II, Moscú, Rusia, URSS, pp. 68-84, 1983.
- YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A.: *Física universitaria*, Ed. Pearson Educación, vol. I, México D. F., pp. 487-569, 2009, ISBN: 978-607-442-288-7.
- ZILESNY, A.: *From Curve Fitting to Machine Learning*, Ed. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2011, ISBN: 978-3-642-21279-6.

Javier A. León-Martínez, Profesor Asistente, Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, e-mail: [compos@nauta.cu](mailto:compos@nauta.cu), [jleon@unah.edu.cu](mailto:jleon@unah.edu.cu)

Antihus A. Hernández-Gómez, Profesor Titular, Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, e-mail: [antihus@unah.edu.cu](mailto:antihus@unah.edu.cu)

Ciro E. Iglesias-Coronel, Profesor Titular, Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ingeniería Agrícola, Portoviejo, Lodana-Santa Ana-Manabí, Ecuador, e-mail: [liudmilashkilioval4@gmail.com](mailto:liudmilashkilioval4@gmail.com)

Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba

The authors of this work declare no conflict of interests.

This item is under license Reconocimiento-NoComercial de Creative Commons 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0).

The mention of trademarks of specific equipment, instruments or materials is for identification purposes, there being no promotional commitment in relation to them, neither by the authors nor by the publisher.