

SENSORES ULTRASÓNICOS: RESPUESTA A DISTINTAS FORMAS DE ONDA DE EMISIÓN

Sergio Gwirc, Fernando Ferdeghini, Agata Comastri, Daniel Lupi

*Centro de Investigación y Desarrollo en Electrónica e Informática (CITEI)
Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI)
C.C. 157, (1650) San Martín, Buenos Aires, Argentina
TE: 4754-5151/55 - FAX: 4754-5194 - EMAIL: sng@inti.gov.ar*

Resumen: En la utilización de transductores de ultrasonido para la determinación de distancias es de suma importancia la relación entre las señales de emisión y eco. El presente trabajo busca optimizar esta relación a través del análisis de la influencia en la variación de ciertos parámetros característicos de la señal de emisión. El estudio se basó en un sistema ultrasónico excitado por una señal de emisión tipo tren de pulsos. Del análisis surgen dos conclusiones significativas: la zona muerta es afectada levemente por estas variaciones, y la amplitud de la señal eco se puede controlar por medio de la de emisión, permitiendo realizar un control de ganancia no convencional.

ULTRASONIC SENSORS: RESPONSE TO DIFFERENT EMISSION WAVEFORMS

Abstract: The relationship between the transmitted and the reflected signal is an important characteristic of a measurement system with ultrasonic transducers. The main purpose of this work is to optimize this relationship by studying the influence of the pulse width and the number of pulses of the electric exciting signal. Two meaningful conclusions emerge from this analysis: The variation of the electric exciting signal does not affect the dead zone. The amplitude of the echo signal can be controlled by varying the transmitted signal, allowing a non conventional gain control.

Keywords: Ultrasonido, Pulso eco.

1. INTRODUCCIÓN

Los transductores de ultrasonido piezoeléctricos se han utilizado durante mucho tiempo tratando de aprovechar al máximo sus características de conversión electromecánica. Sin embargo, las dificultades que surgen de las condiciones físicas de propagación del sonido en el aire hacen que, en la práctica disminuya el nivel de la señal eco detectada, por factores externos al transductor.

La atenuación debida a absorción, dispersión o divergencia del haz hace que la señal de eco producida por una reflexión sea difícil de identificar en los casos en que por su nivel o por la diferencia de impedancias acústicas entre el medio y la superficie reflectante se confunde con rebotes

espurios o no se distingue de la señal que conforma la zona ciega o zona muerta del transductor (Abreu, 1990).

Se denomina zona muerta al intervalo temporal durante el cual aparece una señal en el receptor debido a condiciones no deseadas, tales como el solapamiento de los lóbulos de emisión y recepción, la vinculación mecánica que existe entre emisor y receptor a través del soporte, fenómenos de difracción, etc. La zona muerta se extiende desde el momento en que se produce la emisión hasta un instante establecido por los parámetros antes mencionados, los cuales también fijan el nivel sonoro de la misma.

Si durante este período se recibe una señal de eco, la misma se mezcla con la señal de zona muerta y dependiendo de los niveles relativos de ambas es probable que no pueda detectarse el eco.

2. ANÁLISIS EMPÍRICO

2.1. Sistema de ensayo

Cuando se utiliza el ultrasonido para la detección de objetos, tanto la zona muerta como la atenuación por absorción son los parámetros que mas influencia tienen en la medición.

La zona muerta limita la detección a distancias cortas, mientras que la atenuación restringe el máximo alcance. Cuantitativamente ambas cotas dependen de la cantidad de energía que se transfiere al medio en forma de onda mecánica.

Este trabajo busca ampliar los límites de detección del sistema emisor/receptor mejorando la transferencia de energía al medio sin sobrepasar la limitaciones estructurales del transmisor. Para tener en cuenta las distorsiones que produce ese medio en el conjunto, las mediciones se refieren al transmisor en cuanto a la señal de excitación y al receptor en la señal medida, tomándose al sistema que incluye tanto al medio como al blanco en un conjunto unitario, figura 1.

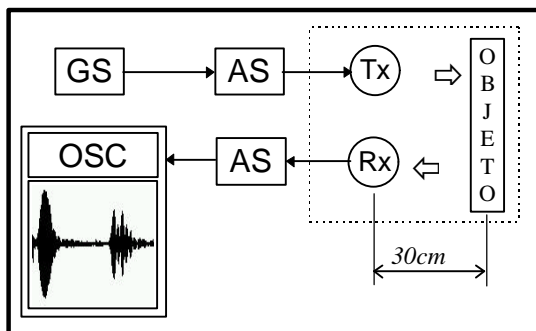


Fig. 1: Diagrama en bloques del sistema ultrasónico.

El generador de señales (**GS**) inyecta, a través de una etapa de acondicionamiento (**AS**), la señal de emisión al transmisor de ultrasonido, el sensor traduce esta excitación de carácter eléctrico en una onda mecánica, la cual se propaga a través del medio. A 30 centímetros del sensor se coloca un obstáculo de referencia, constituido por una placa metálica de 92x200mm, perpendicular a la propagación de la onda emitida, que produce una reflexión de la onda incidente invirtiendo su sentido de propagación, y provocando de este modo su incidencia sobre el receptor de ultrasonido fijado en paralelo al transmisor y a igual distancia del obstáculo. El receptor convierte la onda mecánica que incide sobre el, en una señal eléctrica denominada señal de eco. Dicha señal se

acondiciona y se inyecta en un osciloscopio (**OSC**) para su visualización y análisis.

Para lograr mayor generalidad en el resultado se analizan dos modelos de sensores ultrasónicos de la serie MA de muRata, el 40A5 y el 40S2, de igual frecuencia de resonancia.



Fig. 2: Serie de sensores ultrasónicos MA de muRata

En la figura 3 se representa la forma que posee la señal de eco visualizada en el osciloscopio debida a una emisión ultrasónica causada por el transmisor.

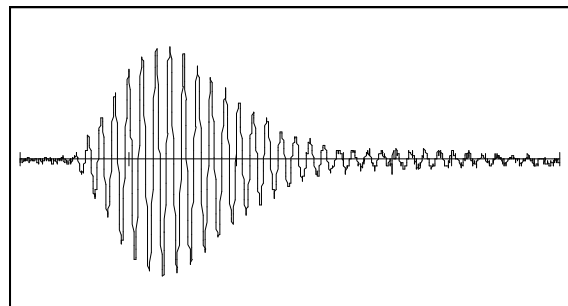


Fig. 3: Forma del eco a la salida del receptor.

Teniendo en cuenta la transferencia de energía al medio en relación a la señal de emisión, se adopta como parámetro de control la amplitud máxima de la señal de eco.

2.2 Señal de emisión

La señal de emisión es un tren de pulsos rectangulares como el que se muestra en la figura 4.

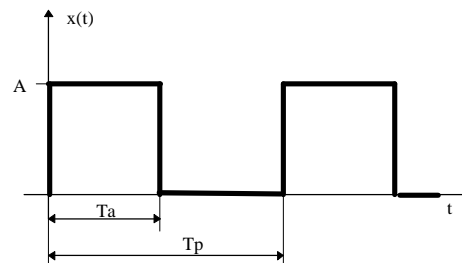


Figura 4.

Siendo:

- A:** Amplitud de los pulsos.
- Ta:** Ancho de los pulsos.
- Tp:** Período de la señal.
- P:** Cantidad de pulsos.

3. INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LA SEÑAL

3.1. Amplitud

El aumento en amplitud de la señal de emisión produce un incremento lineal en la amplitud del eco, y debido a limitaciones constructivas del material, el fabricante del sensor limita la máxima amplitud de excitación a 15V.

3.2. Pulso único

En esta primera etapa se utiliza una señal de emisión consistente en un pulso único de amplitud máxima. El ancho de pulso se varió desde $5\mu\text{s}$ hasta $45\mu\text{s}$, registrando el valor de amplitud de la señal de eco y de la zona muerta durante el intervalo, obteniendo como resultado las curvas representadas en las figuras 5 y 6 para los dos modelos de sensores ensayados.

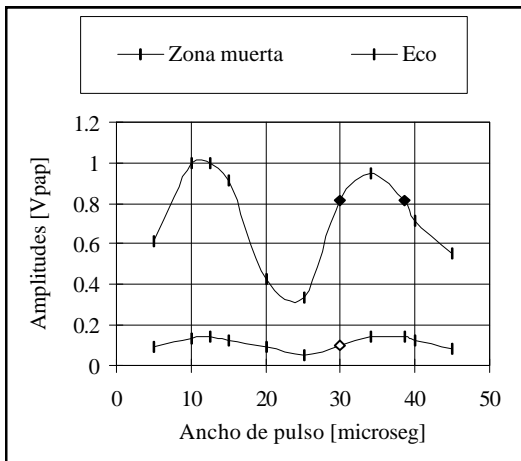


Fig. 5: Modelo MA40A5.

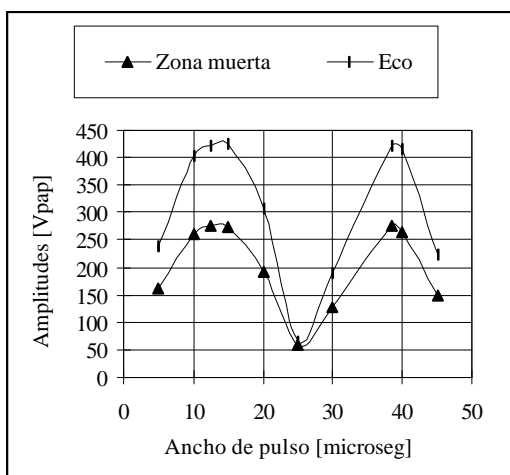


Fig. 6: Modelo MA40S2.

De las figuras se desprende la existencia, para ambos modelos de sensores, de dos valores de ancho de pulso, $12.5\mu\text{s}$ y $37.5\mu\text{s}$, que maximizan la amplitud del eco. Por otro lado, la amplitud de la zona muerta

no se ve incrementada en forma exagerada con esos valores. Esto nos dice que el semiperíodo de oscilación mecánica del transductor coincide con el ancho del pulso. Es decir que si lo excito con un pulso, lo mantengo hasta que la deformación mecánica del sistema piezoeléctrico llegue a su máximo y lo suelto en ese instante, el aprovechamiento de la energía suministrada es máximo.

3.3. Tiempo de repetición

Se espera reforzar la respuesta anterior usando más de un pulso. Para estudiar la influencia que ocasiona una variación en el periodo del pulso, se excita al transmisor ultrasónico con una señal de emisión compuesta por dos pulsos de ancho fijo e igual a $12.5\mu\text{s}$ y una amplitud de 15V.

Variando el periodo del pulso entre $17.5\mu\text{s}$ y $62.5\mu\text{s}$ se relevó el valor de amplitud de la señal de zona muerta y eco obteniendo como resultado las curvas representadas en las figuras 7 y 8 correspondientes a los dos tipos de sensores ensayados.

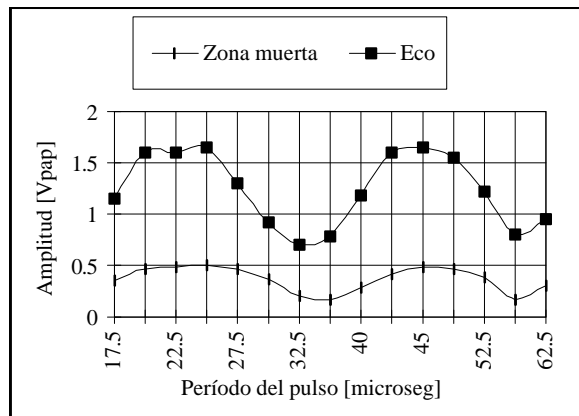


Fig. 7: Modelo MA40A5

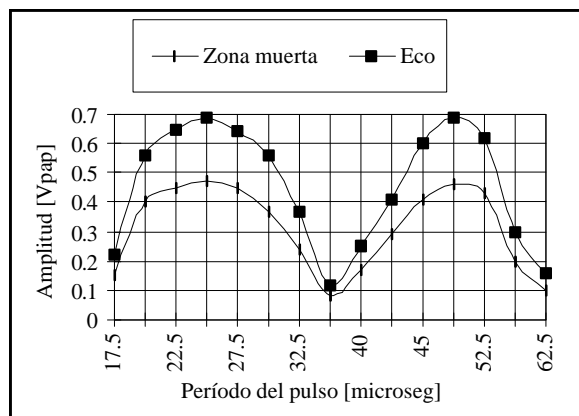


Fig. 8: Modelo MA40S2.

Como se observa en las figuras nuevamente se obtienen dos máximos de emisión y de acuerdo a lo esperado con periodo de $25\mu\text{s}$ y $50\mu\text{s}$, ya que el segundo pulso refuerza la oscilación mecánica al estar en fase con ella.

La amplitud del eco se ve notablemente incrementada, lo que mejora el alcance, pero la amplitud de la zona muerta también aumenta proporcionalmente.

3.4. Cantidad de pulsos

En los puntos anteriores se describió la forma en que influyen la amplitud, el ancho y el periodo del pulso de la señal de emisión sobre la de eco y zona muerta. Como resultado del análisis la señal de emisión optimizada queda compuesta por los siguientes parámetros:

$$\begin{cases} T_a = 12,5 \cdot \mu s \\ T_p = 25 \cdot \mu s \\ A = 15 \cdot V \end{cases}$$

Veamos los efectos que causa variar la cantidad de pulsos de dicha señal, respecto de las señales de eco y zona muerta. Esto se gráfica en las figuras 9 y 10 que manifiestan la variación cuando la cantidad de pulsos se modifica de uno a ocho.

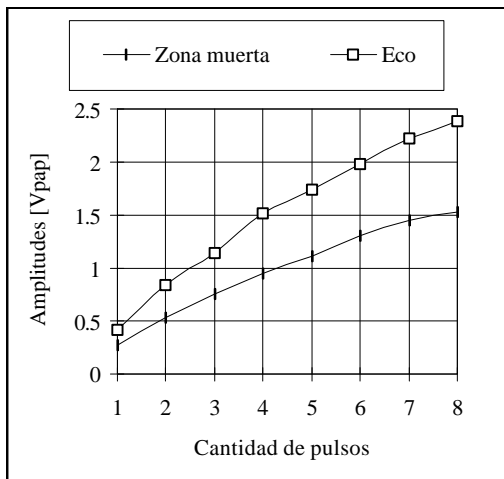


Fig. 9: Amplitudes de las señales de eco y zona muerta. Sensor MA40S2.

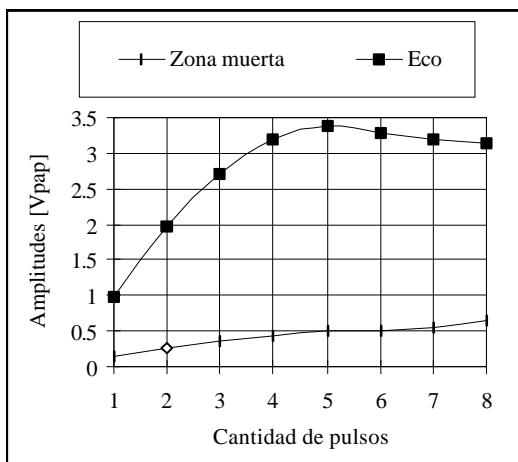


Fig. 10: Amplitudes de las señales de eco y zona muerta. Sensor MA40A5.

Como puede observarse de las figuras existe una zona de comportamiento aproximadamente lineal entre la variación de la cantidad de pulsos y el crecimiento de la amplitud del eco para ambos modelos de sensores. La eficiencia es alta pero se nota un leve descenso con la cantidad de pulsos. Por otro lado la zona muerta sufre un incremento casi lineal distinguiéndose una notoria diferencia entre los dos modelos de sensores con distinta pendiente de crecimiento.

El transductor 40A5 es capaz de aprovechar plenamente el aumento de energía proveniente de hasta 4 pulsos, luego de lo cual entra en una zona netamente no lineal de funcionamiento en la que no se obtienen mejoras. Paralelamente su estructura parece estar bien aislada de las influencias externas que producen la zona muerta. El otro sensor (40S2) se comporta en forma prácticamente lineal hasta el máximo de pulsos utilizados en el análisis. Su zona muerta se incrementa en forma casi paralela al eco, lo que manifiesta una construcción más endeble y menos aislada del entorno.

4. ANÁLISIS DE LA SEÑAL DE EMISIÓN

Hasta ahora se ha logrado optimizar la señal de emisión y encontrar que relación guarda un aumento en la cantidad de pulsos con las señales de eco y zona muerta. Para generalizar estas conclusiones, obtenidas en forma empírica, a continuación se realiza el análisis teórico correspondiente.

La expresión (1) es la ecuación matemática en el espacio temporal del tren de pulsos de la figura 4.

$$x(t) = \sum_{n=0}^{P-1} A \cdot [u(t - n \cdot T_p) - u(t - n \cdot T_p - T_a)] \quad (1)$$

Donde:

$$u(t - T) = \begin{cases} 0 & \text{si } t < T \\ 1 & \text{si } t > T \end{cases}$$

Los transductores de ultrasonido utilizados están caracterizados por una frecuencia de resonancia fija en 40 kHz. Para lograr una mayor transferencia de la señal de emisión al medio se busca que dicha señal posea un espectro frecuencial concentrado en esa frecuencia.

Usando la Transformada de Fourier se obtiene el espectro en el campo de la frecuencia de la señal de emisión.

$$x(f) = \left| \frac{j \cdot A}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \sum_{n=0}^{P-1} \left[e^{(j2\pi \cdot n \cdot T_p) \cdot f} \cdot \left(1 - e^{(j2\pi \cdot T_a) \cdot f} \right) \right] \right|^2 \quad (2)$$

Si el valor **P** que define la cantidad de pulsos es un valor finito, la ecuación (1) representa una señal aperiódica y el módulo de la transformada de Fourier al cuadrado de dicha señal, ecuación (2), representa el espectro de densidad de energía que caracteriza a dicha señal.

Como se observa en la ecuación (2) los parámetros característicos de la señal de emisión influyen sobre el espectro frecuencial de dicha señal (Oppenheim and Willsky, 1997).

La variación en la amplitud de la señal afecta al espectro en forma proporcional en todo el rango de frecuencias. Esto indica que a mayor amplitud, mayor energía útil se transfiere al medio; esta relación es lineal y tiene un máximo, limitado por la máxima amplitud que soporta entre bornes el emisor de ultrasonido.

Para analizar la influencia del ancho del pulso se limita la señal de excitación a un sólo pulso.

Por lo tanto:
$$\begin{cases} A = 1 \\ P = 1 \end{cases} \quad (3)$$

Remplazando (3) en (2) se obtiene:

$$x(f) = \left| \frac{j \cdot \left(1 - e^{(j \cdot 2 \cdot \pi \cdot T_a) \cdot f} \right)}{2 \cdot \pi \cdot f} \right|^2 \quad (4)$$

La ecuación (4) representa el espectro de densidad de energía en función del ancho del pulso de la señal de emisión y es graficado en la figura 11.

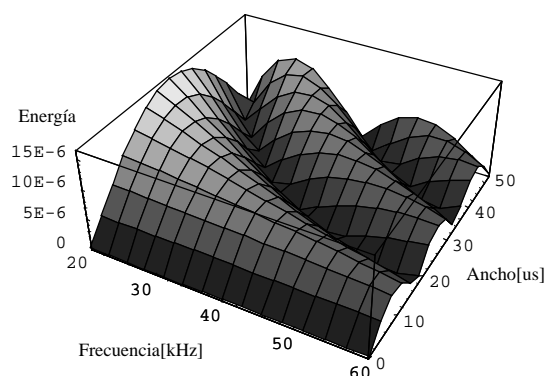


Figura 11.

Para optimizar el ancho del pulso de forma tal que se transfiera máxima energía al medio para una determinada señal de emisión, resulta útil visualizar en la figura 12 la representación de una curva de nivel para los 40 kHz.

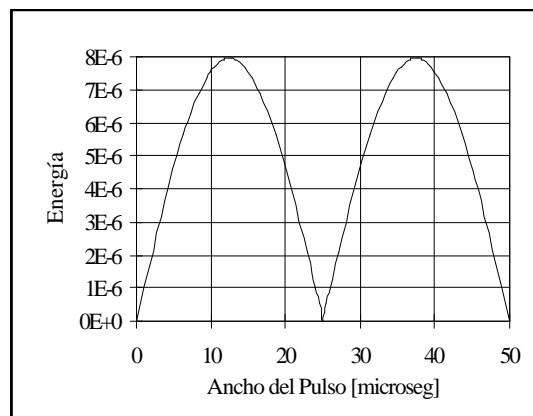


Figura 12.

Queda claro que existen dos valores de ancho de pulso que maximizan la transferencia de energía al medio 12,5µs y 37,5µs.

Si consideramos dos pulsos de disparo y se adopta como ancho de pulso el valor óptimo hallado antes.

Obtenemos:
$$\begin{cases} A = 1 \\ P = 2 \\ T_a = 12,5 \cdot \mu s \end{cases} \quad (5)$$

Los cuales remplazados en la ecuación (2) dan como resultado la gráfica de la figura 13.

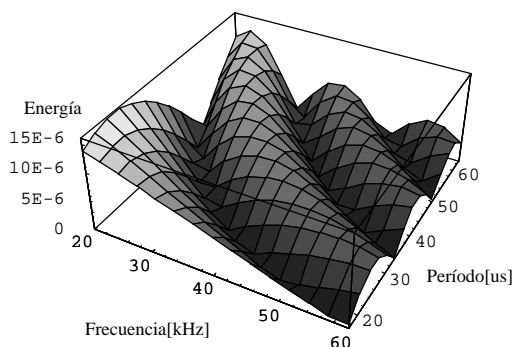


Figura 13.

Al igual que en los puntos anteriores en base a la figura 13 se optimiza el período del pulso para una frecuencia de 40 kHz, obteniéndose la curva de nivel representada en la figura 14.

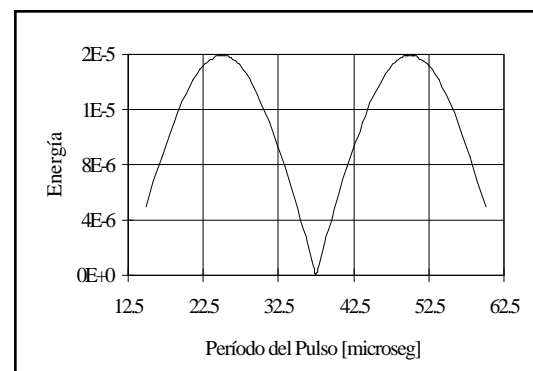


Figura 14.

De la figura 6 se desprende que para un período de $25\mu\text{s}$ se obtiene máxima transferencia de energía al medio.

Considerando la cantidad de pulsos como variable y adaptando los parámetros:

$$\begin{cases} A = 1 \\ T_p = 25 \cdot \mu\text{s} \\ T_a = 12,5 \cdot \mu\text{s} \end{cases} \quad (6)$$

En la figura 15 se representa el espectro de densidad de energía generado por la ecuación que resulta de remplazar los parámetros anteriores en la ecuación (2).

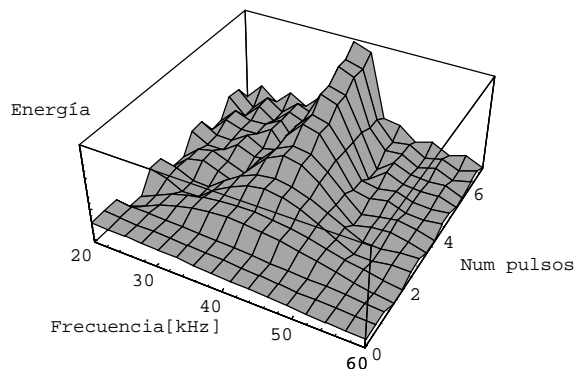


Figura 15.

A continuación en la figura 16 se observa una curva de nivel de la superficie anterior para una frecuencia de 40 kHz.

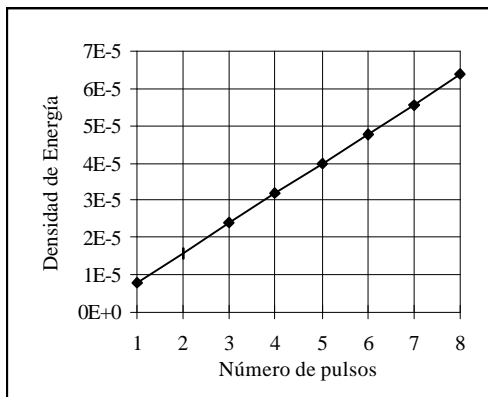


Figura 16.

5. CONCLUSIONES

Se han implementado distintas formas de aumentar la distancia de medición con transductores de ultrasonido comerciales de corto alcance, aprovechando al máximo su capacidad de transferencia de energía al medio.

Del análisis resulta que al existir una relación lineal entre la amplitud de la señal de eco y la cantidad de pulsos de la señal de emisión puede realizarse un control de ganancia variable con la cantidad de

pulsos, presentando como principal ventaja la posibilidad de implementar un sistema con ganancia fija y modificar la cantidad de pulsos según la distancia a la cual se desea explorar.

Es deseable realizar mejoras en la aislación acústica, tanto del emisor como del receptor, para disminuir la zona muerta, en especial en el caso del modelo 40S2.

6. REFERENCIAS

Abreu José Miguel Martín. “Análisis de señales ultrasónicas para la definición de entornos en el campo de la robótica”. Memoria presentada para optar al grado de doctor. Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Físicas, Departamento de Electrónica. Madrid, España. 1990.

Oppenheim, Alan V, Willsky, Alan S. (1997). *Signal & Systems*, Capitulo 4, Prentice Hall, United States Of America.

7. AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración del Instituto de Automática Industrial I.A.I. Madrid, España, por sus valiosos aportes.