

**EVALUACIÓN TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN PROCEDIMIENTO POR
CODIFICACIÓN EN AMPLITUD PARA MEDIR DISTANCIAS CON
ULTRASONIDO**

LAURA XIMENA CHAPARRO GUAYARA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
BUCARAMANGA
2013**

**EVALUACIÓN TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN PROCEDIMIENTO POR
CODIFICACIÓN EN AMPLITUD PARA MEDIR DISTANCIAS CON
ULTRASONIDO**

LAURA XIMENA CHAPARRO GUAYARA

**Trabajo de Grado para optar al Título de Físico
Modalidad Proyecto de Investigación**

Director

Carlos Ricardo Contreras Pico, M.Sc.

Codirector

Jaime Enrique Meneses Fonseca, Ph.D.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
BUCARAMANGA
2013**

A Dios por darme la oportunidad de vivir, de ser el ser que soy, por darme muchas oportunidades para crecer como persona y como profesional, por llenar mi vida de días felices y de regalos.

A mi familia por su invaluable apoyo, A mi padre, José Salvador Chaparro, por su guía, por ser un gran soporte para mí. A mi madre Margy Guayara, por su motivación, positivismo en que las cosas se pueden, pese a las dificultades. A mis hermanos Carlos, María José y Sara Sofía, por ser mi motivación más grande a continuar y no rendirme. A mi hermana Ana María por ser mi compañera y estar conmigo en los buenos y los malos momentos.

A mi novio Leonardo Gómez Bernal, por su amoroso apoyo, por ser una inspiración para ser cada día mejor y permitirme soñar con un futuro junto a él, por comenzar a caminar juntos a mí por el camino de la vida.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis sinceros agradecimientos:

- Al Doctor Jaime Enrique Meneses Fonseca por su paciencia, orientación y apoyo durante la realización de este proyecto, por su confianza hacia mí, por todos los conocimientos impartidos y por inculcar en mí el amor y la dedicación en cada una de las cosas que se hacen. Unos renglones dedicados en este escrito no describen el conocimiento aportado por este gran profesional, director, gran persona.
- A mi director Carlos Ricardo Contreras Pico por su paciencia y orientación en la etapa final de este trabajo, por darme la oportunidad de aprender junto a él.
- Al Doctor David Alejandro Miranda por sus invaluable consejos, que buscan un desarrollo integral como profesional.
- A los compañeros y profesores del grupo de Óptica y Tratamiento de Señales GOTS: Carlos Alberto, Cristian David, Cristian Hernando, Alexander, Janeth, Carolina, Dr. Arturo Plata, quienes durante el pregrado y el desarrollo de este trabajo prestaron su apoyo como compañeros, colegas, Gracias.
- A mi hermana Ana María por el apoyo y por haber estado ahí en todos los momentos buenos y malos, por la paciencia, por la compañía, por los cuidados en momentos de enfermedad y recuperación, por su preocupación constante por todas las cosas que nos sucedían. Por ser la mano amiga en instantes de dificultad, por ayudarme a levantar en estos momentos y por ser una gran consejera.

- A mi familia por la paciencia y el apoyo en todo momento, por estar siempre conmigo en los buenos y malos momentos y acompañarme con el corazón y con el pensamiento, debido a la distancia que nos separa.
- Al ser que llego a mi vida para hacer de mi una mejor persona y una mejor mujer... a mi novio Leonardo por exigirme con amor y guiarme con paciencia, por acompañarme y apoyarme durante el desarrollo de este trabajo de grado.
- A mi amiga Lina Paola Aldana, porque pese a la distancia, su gran apoyo en los momentos difíciles ha sido muy importante para mí.
- A mis amigos y compañeros William López, Johana Rojas, Carolina Mendoza, Martha Jerez, Alfredo Blanco, Luz Dary Morantes, Laura Lara, Rafael Gelvez, Liliana Gómez, José David Jaimes, Laura Daniela Ordíñez, Leidy Tatiana Mayorga, Jorge Erick Rueda, Paola Díaz, María Fernanda Lozano, Mayra Isabel Vargas, Maribel Rodríguez, Alexander Ballesteros, Iván Fernando Estupiñan, John Jadder Sandoval, Diego Eduardo Acevedo, Diego Andrés Chaparro, Marly Palencia, Nelsy Garzón, Oscar Bautista, Nelson, porque por medio de sus consejos y compañía he podido superar dificultades y tiempos difíciles, porque a su lado he vivido maravillosos momentos y porque cada uno aportó a mi vida cosas invaluableles.
- A todas las personas que de una u otra manera, con sus oraciones y buenos deseos contribuyeron a que este logro sea posible.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	16
1 TEORÍA DEL MEDIDOR DE DISTANCIAS	18
1.1 ASPECTOS PRELIMINARES	18
1.2 ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE UN DISPOSITIVO DE MEDIDA DE DISTANCIAS	20
1.2.1 TIPOS DE SEÑALES ENVIADAS EN ESTOS DISPOSITIVOS	23
1.3 TRATAMIENTO DE LAS SEÑALES	25
1.4 RESOLUCIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE MEDICIÓN DE DISTANCIAS CON ULTRASONIDO	30
2 ESQUEMA DE GENERACIÓN DE LA SEÑAL EMPLEANDO ULTRASONIDO	32
2.1 DISPOSITIVOS DE MEDIDA: TRANSDUCTORES ULTRASÓNICOS	32
2.2 PROCESO DE CODIFICACIÓN M-SEQUENCE (M-SECUENCIA)	35
2.3 DISPOSITIVO ELÉCTRICO GENERADOR DE LA SEÑAL	40
2.4 SISTEMA DE ADQUISICIÓN	47
3 PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES	52

3.1	HIPÓTESIS PARA EL PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES	55
3.2	FUNDAMENTOS DEL MÉTODO DE PROCESAMIENTO	57
3.3	APLICACIÓN DEL MÉTODO DE PROCESAMIENTO	59
3.4	RESULTADOS	67
4	CONCLUSIONES	75
5	PERSPECTIVAS DE TRABAJO FUTURO.	76
	BIBLIOGRAFÍA	77

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Esquema de un dispositivo para medir distancias que utiliza la técnica de tiempo de vuelo.	21
Figura 2. Circuito medidor de distancia UCM.R4OK1.	22
Figura 3. Pulso rectangular.	23
Figura 4. Tren de pulsos rectangulares.	24
Figura 5. Relaciones de entrada - salida en los dominios del tiempo y la frecuencia.	26
Figura 6. Evaluación del filtro de Wiener.	28
Figura 7. Envolvente eco para 4 objetivos, 1 en movimiento, 2, 3 y 4, fijos.	29
Figura 8. Medidores de distancia a) CP-3007 b) CP-3009	30
Figura 9. Esquema de funcionamiento medidor de distancia con ultrasonido.	32
Figura 10. Transductores Ultrasónicos T4016 y R4016.	34
Figura 11. Corrimiento temporal de un ciclo.	35
Figura 12. Esquema correspondiente a la operación XOR.	37
Figura 13. Operación XOR para una longitud de registro $n=5$.	37
Figura 14. M-Secuencia de 217 bits calculada a partir de una longitud de registro $n=8$.	38
Figura 15. Representación de los bits uno y cero.	39

Figura 16. Señal de excitación eléctrica enviada al emisor del ultrasonido.	40
Figura 17. Esquema del Hardware del dispositivo GEN_CODE.	41
Figura 18. Dispositivo electrónico generador de la señal GEN_CODE.	42
Figura 19. Ejemplo conversión de la secuencia binaria a caracteres ASCII	43
Figura 20. Interfaz de control GEN_CODE.	43
Figura 21. Selección del puerto serial.	44
Figura 22. Comunicación exitosa con el dispositivo generador GEN_CODE.	44
Figura 23. Parte de la interfaz donde se cargan los datos.	45
Figura 24. Ventana para seleccionar el archivo que se quiere cargar.	45
Figura 25. Datos cargados satisfactoriamente para los comandos a)*lob240; b)*loc240; y c)*loa32;	46
Figura 26. a) Tarjeta de adquisición NI PCI 6251. b) Bloque conectar NI SCC 6848	
Figura 27. Interfaz de adquisición de las señales.	49
Figura 28. Montaje Experimental.	50
Figura 29. Montaje Experimental.	50
Figura 30. Interfaz de adquisición con un dato cargado a x= 7 cm.	51
Figura 31. Montaje de los transductores ultrasónicos.	52
Figura 32. a) Datos del canal 1. b) Datos canal 2. Para una distancia x= 4 cm de separación entre los transductores.	54
Figura 33. a) Canal 2, señal del receptor, b) espectro de Fourier del canal 2.	59

Figura 34. a) Amplitud, b) fase obtenidos a partir de la transformada de Fourier inversa.	60
Figura 35. Señales correspondientes a una distancia de separación $x=10$ cm y $\Delta x=100$ micras para a) señal del emisor b) señal del receptor.	60
Figura 36. a) Señal del emisor b) Envolvente normalizada de la señal del emisor c) Señal del receptor d) Envolvente normalizada de la señal del receptor.	61
Figura 37. Transiciones al interior de la envolvente de la señal recibida.	62
Figura 38. Fase discontinua de 14 transiciones correspondiente a la señal del emisor para un bit de la señal.	63
Figura 39. Fase discontinua de 20 transiciones correspondiente a la señal del receptor para un bit de la señal.	63
Figura 40. Matrices de valores medios y desviaciones estándar para $x=10$ cm a) $\Delta x=100$, b) $\Delta x= 200$, c) $\Delta x=500$ y d) $\Delta x=1000$ micras.	64
Figura 41. Posición central a) señal del emisor b) señal del receptor	67
Figura 42. Desplazamientos teóricos Δx vs desplazamientos experimentales Δx .	69
Figura 43. Desplazamientos teóricos Δx vs error.	69
Figura 44. Desplazamientos Teóricos Δx vs desviación estándar.	70
Figura 45. Distancias de separación x vs error para un desplazamiento $\Delta x=100$ μm .	71
Figura 46. Distancias de separación x vs error para un desplazamiento $\Delta x=200$ μm .	72

Figura 47. Distancias de separación x vs error para un desplazamiento $\Delta x=500$ μm . 72

Figura 48. Distancias de separación x vs error para un desplazamiento $\Delta x=1000$ μm . 72

Figura 49. Distancias de separación x vs Desviación estándar. 73

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Características circuito medidor de distancia UCM-R4OK1	30
Tabla 2. Características Transductores Ultrasónicos.	34
Tabla 3. Representación de la operación Exclusive OR (XOR).	36
Tabla 4. Relación de desplazamientos del transductor receptor con respecto al emisor.	53

RESUMEN

TÍTULO: Evaluación teórico experimental de un procedimiento por codificación en amplitud para medir distancias con ultrasonido.*

AUTOR: CHAPARRO GUAYARA, Laura Ximena.**

PALABRAS CLAVE: Ultrasonido, M-Secuencia, Metrología, Resolución

RESUMEN

Los dispositivos medidores de distancias con ultrasonido tradicionalmente emplean la emisión de trenes pulsados y miden la distancia utilizando la técnica de tiempo de vuelo, que consiste en determinar el tiempo que tarda la onda en viajar desde el dispositivo emisor hasta el dispositivo receptor. El retardo entre las señales emitida y recibida se mide en número entero de pulsos y la fracción residual de la señal recibida respecto a la señal emitida. Para codificar la señal existen diferentes estrategias con el fin de determinar el número entero de pulsos desplazados debido al retardo de la señal. En este trabajo se presenta un procedimiento por codificación en amplitud llamado M-Secuencia en una señal con trenes de pulsos rectangulares de amplitud 3V y frecuencia 40kHz. Esta es una codificación binaria pseudo-aleatoria que permite obtener una secuencia de periodo L bits.

El procesamiento de las señales se realiza con el fin de verificar si el esquema planteado mide variaciones de distancia entre emisor y receptor a resoluciones superiores a la resolución de los dispositivos comerciales (1 cm). Debido a la estructura periódica de las señales, el procesamiento implementado consiste en calcular la envolvente de las señales y su fase discontinua, y con esta información determinar la posición central de N trenes pulsados con N-1 transiciones al interior de la fase discontinua. La posición central de los trenes se encuentra interpolando el cero entre dos transiciones N1 y N2 en la fase discontinua que delimitan la posición central de los trenes. La validación experimental muestra que para un rango de medida de 4 a 20 cm, el límite de resolución del sistema está en ± 100 micras al realizar una medida a una frecuencia de muestreo de 250kHz y

27 ms de adquisición.

* Trabajo de grado.

** Escuela de Física. Facultad de Ciencias. Universidad Industrial de Santander. Director: Carlos Ricardo Contreras Pico, M.Sc. Codirector: Jaime Enrique Meneses Fonseca, Ph.D

ABSTRACT

TITTLE: Theoretical and experimental evaluation of a procedure through amplitude encoding to measure distances with ultrasound.*

AUTHOR: CHAPARRO GUAYARA, Laura Ximena.**

KEY WORDS: ultrasound, M-Sequence, metrology, resolution

ABSTRACT

Most of distance measuring devices use a pulse train of ultrasound emission and the time-of-flight technique to measure the distance, which consists on determine the time that the wave takes to travel from the sending device to the receiving device. The delay between emitted and received signals is measured in number of pulses and the residual fraction of the received signal relative to the emitted signal. There are different strategies to encode the signal in order to determine the number of displaced pulses due to signal delay. This paper presents a method for encoding amplitude, called M-sequence, of a signal with a rectangular pulse trains, 3V amplitude and 40 kHz frequency. This is a pseudo-random binary code which produces a sequence with a period of L bits.

The signal processing is performed in order to verify if the proposed scheme can measure the distance between transmitter and receiver with higher resolutions than commercial devices (1 cm). Given of the periodic structure of the signal, the processing is implemented to calculate the envelope of the signal and its discontinuous phase, and to determine the central position of N pulsed trains with N-1 transitions into the discontinuous phase, also with this information. The central position of the trains is zero interpolating between two transitions N1 and N2 in the discontinuous phase that limits the central position of the trains. For a measuring range of 4 to 20 cm, the experimental validation shows that the resolution limit of the system is within ± 100 microns when a measurement with sampling frequency of 250kHz and 27 ms acquisition is performed.

* Grade work.

** School of Physics. Faculty of Sciences. Universidad Industrial de Santander. Director: Carlos Ricardo Contreras Pico, M.Sc. Codirector: Jaime Enrique Meneses Fonseca, Ph.D

INTRODUCCIÓN

En la actualidad los dispositivos medidores de distancias son de gran importancia en el campo industrial. Se encuentran a nivel comercial dos clases de dispositivos medidores de distancias que dependen del tipo de onda emitida. Una de las clases de estos dispositivos medidores trabaja con un emisor láser, como es el caso del dispositivo conocido como Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging (LIDAR), que es un dispositivo que determina la distancia desde un emisor láser a un objeto o superficie utilizando un haz láser. La otra clase de dispositivos de medida comúnmente utilizados son aquellos que trabajan enviando señales ultrasónicas.

La técnica convencional utilizada para medir distancias es la del tiempo de vuelo, que consiste en determinar el retardo temporal que posee la onda periódica al viajar desde el emisor hacia el objeto y regresar [3]. Esta técnica presenta algunas dificultades en el cálculo de las distancias, especialmente cuando se envían trenes de pulsos a una frecuencia determinada y el retardo es superior a un periodo completo, debido a la superposición de los trenes y a que se pierde la referencia para medir el retardo. Por lo tanto no se puede calcular la distancia de manera directa ya que para esto se requiere conocer el corrimiento temporal entre la señal emitida y la señal recibida. Con el fin de resolver este inconveniente, algunos dispositivos emplean codificación en fase, amplitud o frecuencia para calcular el retardo absoluto de la señal, teniendo en cuenta el número de ciclos completos. De manera similar a la transmisión de señales inalámbricas en la modulación se emplea un código conocido que sirve para identificar y referenciar cada tren de pulsos, pudiéndose determinar el retardo de la señal.

En este trabajo se propone una estrategia para medir distancias con señales de ultrasonido moduladas en amplitud, empleando como código una señal pseudo-aleatoria binaria. Como la señal que se envía contiene una señal sinusoidal

modulada en amplitud, la respuesta impulsional del sistema propuesto genera una señal sinusoidal de amplitud variable con una envolvente similar a la carga y descarga capacitiva. Este comportamiento observado en la forma de la envolvente de la señal permitió observar que el sistema implementado es lineal e invariante en el tiempo y que la influencia de la distancia sobre la amplitud posee un factor multiplicativo. La estrategia que se propone consiste en emplear la fase de la señal para posicionar en el tiempo cada tren de pulsos. Este posicionamiento tiene precisión superior al tiempo de muestreo de la señal.

El presente manuscrito se organiza de la siguiente manera:

En el capítulo 1 de este trabajo se presenta la teoría del medidor de distancia, que incluye los conceptos básicos de la propagación de las ondas acústicas y los factores que influyen en el cambio de la velocidad de la onda. De igual manera se muestra el esquema de funcionamiento de un dispositivo medidor de distancia con ultrasonido, explicando la técnica utilizada para medirlas, un esquema de la forma de emisión de las señales, el tratamiento de las señales de los dispositivos y la resolución de los dispositivos comerciales.

En el capítulo 2 se hace una descripción del dispositivo implementado para enviar y recibir las señales, el proceso de codificación de la señal y su aplicación para generar una señal de excitación eléctrica, el funcionamiento del dispositivo generador de la señal y por último el proceso de adquisición de las señales y su almacenamiento.

El tercer capítulo se centra en el tratamiento de las señales almacenadas, el funcionamiento del algoritmo utilizado para el procesamiento y los resultados obtenidos. Finalmente realizan las recomendaciones para los trabajos a futuro y se plantean las perspectivas de continuación de este trabajo.

2 TEORÍA DEL MEDIDOR DE DISTANCIAS

2.1 ASPECTOS PRELIMINARES

Una onda acústica es una onda mecánica que se propaga de manera compresional, en un medio elástico y continuo y genera una variación local de la presión, transmitido en forma de onda esférica. Las variaciones de presión o temperatura en el medio producen desplazamientos en las moléculas que lo forman, provocando un movimiento en cadena, debido a que cada molécula transmite la vibración de sus vecinos [7].

Estas ondas necesitan de un medio para propagarse (aire, agua, material solido) que transmita la perturbación. La velocidad del sonido cambia dependiendo del medio a través del cual se propaga (es más rápida en sólidos, es lenta en el aire y no hay propagación de la onda en el vacío). Esta velocidad también varía ante los cambios de temperatura del medio. Esto se debe a que al aumentar la temperatura, aumenta la frecuencia con que se producen las interacciones entre las partículas que transporta la vibración, y esto da como resultado un aumento en la velocidad [7].

En el aire, a 0 °C, el sonido viaja a una velocidad de $331,5 \left[\frac{m}{s} \right]$ (por cada grado centígrado que sube la temperatura, la velocidad del sonido aumenta en $0,6 \left[\frac{m}{s} \right]$).

La expresión que relaciona la velocidad del sonido en el aire con la temperatura está dada por

$$c = 331,5 + 0,6 * T(^{\circ}C) \left[\frac{m}{s} \right] \quad (1.1)$$

La velocidad de las ondas acústicas en el aire es de $343 \left[\frac{m}{s} \right]$ a 20 °C de temperatura a nivel del mar.

Las ondas de ultrasonido son un tipo de ondas acústicas que no pueden ser captadas por el oído, debido a que tienen una frecuencia mayor que la frecuencia máxima dentro del rango audible (frecuencias mayores a 20 KHz) [5] y [7]. Estas ondas obedecen las mismas leyes del movimiento que las ondas acústicas de frecuencias más bajas y las siguientes ventajas si se usan para medir distancias:

- 1) Las ondas de frecuencias altas tienen longitudes de onda cortas, lo cual significa que la difracción en torno a un obstáculo con dimensiones determinadas se reduce. Esto facilita el dirigir y enfocar un haz de ultrasonido.
- 2) Las ondas ultrasónicas pueden atravesar sin dificultad las partes metálicas de tubos y recipientes.
- 3) Las ondas ultrasónicas pueden emitirse y propagarse a través de tejido biológico, lo que las hace idóneas en aplicaciones médicas.
- 4) Al ser ondas que no pueden ser captadas por el oído por ser ondas de altas frecuencias, estas ondas son aprovechadas en aplicaciones militares.

Estas ondas han sido de gran importancia en los últimos años. Sus propiedades únicas han sido aplicadas en la industria, la medicina y en muchos otros campos [10].

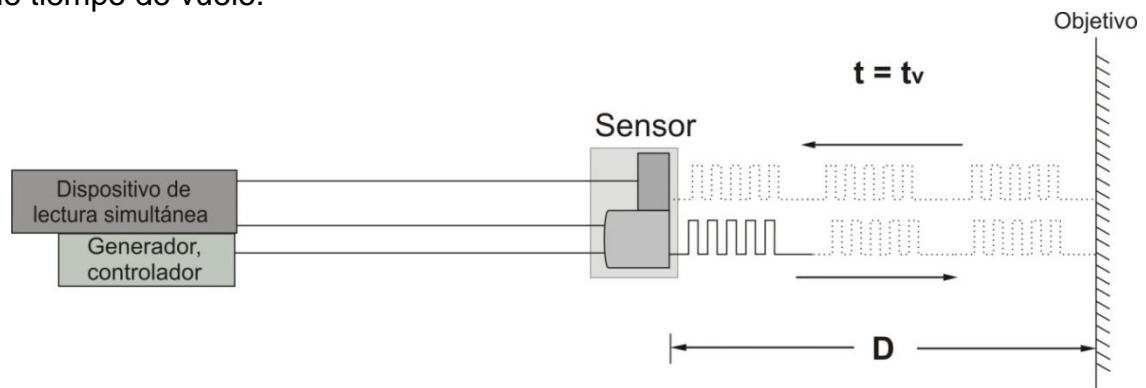
2.2 ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE UN DISPOSITIVO DE MEDIDA DE DISTANCIAS

Existen varias técnicas no-contacto en sensores que son utilizados para medir distancias a objetos, parámetros relacionados con el desplazamiento, perfiles de superficie, velocidades, etc.

La relación entre la medición de la distancia y los otros parámetros mencionados es sencilla: el desplazamiento se define como el cambio de la distancia con respecto a un punto de referencia cuya distancia absoluta podría ser determinada con la misma precisión; los perfiles de superficie se obtienen mediante el cambio en la distancia medida al trasladar lateralmente el objeto o un sensor respecto al otro; la velocidad (rapidez) es la derivada con respecto al tiempo de la distancia o el desplazamiento, refiriéndose de manera general al movimiento oscilatorio en una dirección.

Algunas técnicas utilizadas para medir distancias utilizan fuentes de trenes o fuentes pulsadas. Para el caso de este trabajo, se utilizan sistemas que emplean la técnica de tiempo de vuelo (en inglés "Time of Flight"). En esta técnica la distancia se encuentra mediante el envío de ondas (electromagnéticas, acústicas, entre otras) hacia el objetivo y se mide el tiempo que toma la onda en viajar desde el sensor hasta el objeto y el regreso de la onda al sensor desde el objetivo, como se muestra en la Figura 1. La distancia viene dada por el tiempo de vuelo de viaje de la onda multiplicado por la velocidad de la onda.

Figura 1. Esquema de un dispositivo para medir distancias que utiliza la técnica de tiempo de vuelo.



Una de las primeras aplicaciones de este método fue el radar (acrónimo de Radio Detection And Ranging) usando microondas y fuentes de radiofrecuencia que requieren de potentes emisores y receptores.

La mayoría de los dispositivos de medida de distancias que utilizan un laser y la técnica de tiempo de vuelo operan mediante el envío de un pulso de luz corto (de duración en la escala de nanosegundos). Para objetos que se encuentran a una distancia mayor a 50 m, con un tiempo de tránsito (ida y vuelta) mucho mayor que el ancho del pulso, el tiempo de vuelo puede ser medido por detectores y una electrónica sencilla. A distancias mucho más cortas las mediciones del tiempo de vuelo deben tener en cuenta la forma del pulso temporal con el fin de medir correctamente el retardo en tiempo entre los pulsos de salida (emitidos) y de entrada (recibidos). Eventualmente los pulsos de entrada y salida se superponen y la detección muy rápida utilizando algoritmos de adquisición y procesamiento deben ser utilizados para evaluar el retardo en el tiempo entre las dos señales [3].

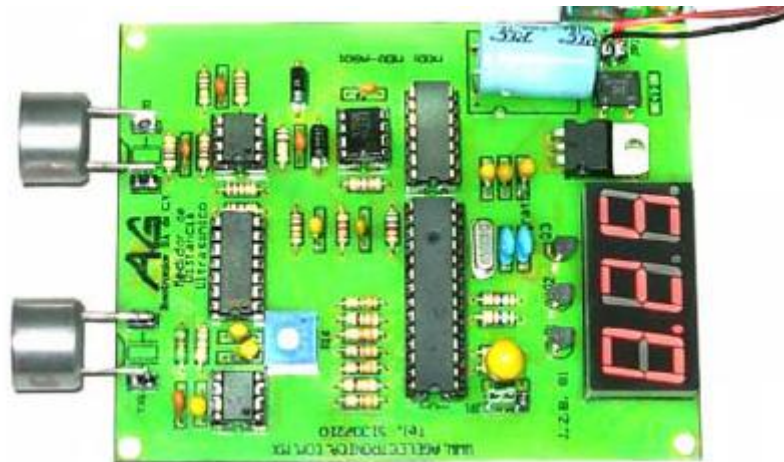
En estos dispositivos una aproximación alternativa para la generación del pulso es el uso de una amplitud modulada de luz continua. En este caso el corrimiento en la fase de la señal modulada es medido entre la señal emitida o de salida y la señal recibida o de entrada, y el tiempo de vuelo se determina dividiendo el corrimiento en la fase por la modulación en frecuencia. El corrimiento real en la fase es la fase

residual medida más un número entero de ciclos completos (corrimientos de fase de 2π).

Los sensores que utilizan la técnica de tiempo de vuelo en modo pulsado son la técnica más utilizada para la detección de distancias superiores a 50 metros y son utilizados en muchas aplicaciones tales como cartografía y topografía. En estas aplicaciones, la resolución y la precisión dependen de la exactitud de la electrónica. El alcance máximo en distancia depende de la potencia del sensor, la sensibilidad del detector, la reflectividad y de la relación señal/ruido [3].

Dentro del esquema de funcionamiento de un dispositivo para medir distancias con ultrasonido, se emplea la técnica de envío de señales por ráfaga, empleando transductores ultrasónicos y enviando trenes de pulsos a 40 KHz, ver circuito en figura 2 [16].

Figura 2. Circuito medidor de distancia UCM.R4OK1.



FUENTE: Javier Zamudio. A.G Electrónica S.A. de C.V. [16].

La distancia es calculada leyendo el tiempo que tarda la onda en viajar hasta el obstáculo y regresar al dispositivo (tiempo de vuelo). Idealmente el obstáculo debe tener una sección transversal grande y no absorber las ondas de ultrasonido. El tiempo transcurrido entre el comienzo de la emisión y el comienzo de la recepción será proporcional a la distancia recorrida por las ondas ultrasónicas [16].

2.2.1 TIPOS DE SEÑALES ENVIADAS EN ESTOS DISPOSITIVOS

En dispositivos medidores de distancia que utilizan ultrasonido, en la emisión de la señal se utiliza un dispositivo generador conectado al transductor transmisor. Este dispositivo generador comúnmente emplea una codificación en pulsos, o en trenes de pulsos, para enviar y recibir la señal.

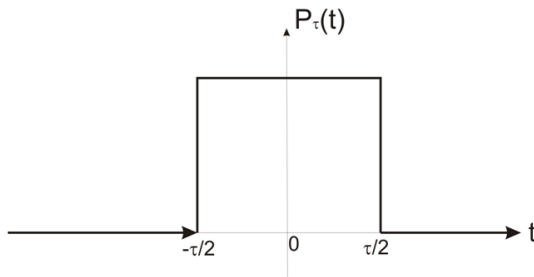
Un pulso se define como un grupo corto de ondas. El pulso puede ser de diferentes formas (ej. pulso cuadrado, pulso triangular, etc.). El pulso puede tener la misma amplitud y puede detenerse o comenzar rápidamente. De esta manera, su envolvente, es decir, la posición de los puntos en sus extremos es una onda cuadrada. La onda cuadrada es una onda que alterna su valor entre dos valores extremos [5]. Matemáticamente, esta señal puede ser representada como una función rectángulo, denotada como $x_{\tau}(t)$ en la ecuación (1.2) y mostrado en la figura 3

$$x_{\tau}(t) = \begin{cases} 1, & -\frac{\tau}{2} \leq t \leq \frac{\tau}{2} \\ 0, & \text{para los demas } t \end{cases} \quad (1.2)$$

Donde τ es la duración del pulso. Otra forma de representación matemática del pulso cuadrado se muestra en la ecuación (1.3)

$$P(t) = \text{rect} \left[\frac{t}{\tau} \right] \quad (1.3)$$

Figura 3. Pulso rectangular.



El contenido espectral de una onda cuadrada con un periodo igual al doble de τ , se compone exclusivamente de armónicos impares (f , $3f$, $5f$, etc.) [5] y [9].

Un tren de pulsos es una señal de tiempo continuo $x(t)$, y es una función periódica si se cumple con

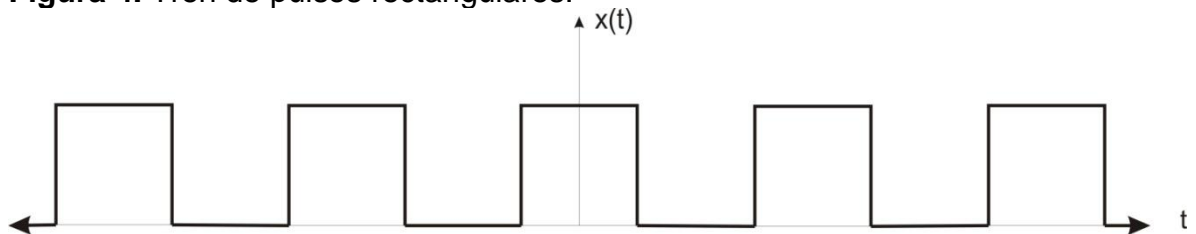
$$x(t + T) = x(t) \text{ para todo } t, -\infty < t < \infty \quad (1.4)$$

Donde T es un número real positivo. Matemáticamente esta señal pulsada puede ser representada mediante la ecuación 1.5

$$x(t) = P_{\tau}(t) * \cos(2\pi f_0 t) \quad (1.5)$$

Donde τ es la duración del pulso y f_0 es la frecuencia). En la figura 4 se muestra una representación de un tren de pulsos [2].

Figura 4. Tren de pulsos rectangulares.



2.3 TRATAMIENTO DE LAS SEÑALES

Esta técnica de tiempo de vuelo es utilizada en dispositivos que emplean ondas acústicas (ultrasonido), principalmente. En un sistema típico de medida de eco pulso, el transductor emisor es estimulado con una señal pulsada, expresada matemáticamente según la expresión 1.6.

En dispositivos de medición de distancia que utilizan ultrasonido, la onda acústica es emitida en un medio, es reflejada por un objeto y regresa de nuevo al transductor, registrando un tiempo de propagación ida y vuelta (tiempo de vuelo). En el dominio de la frecuencia, la señal recibida $e(t)$ puede describirse como la réplica de la señal de entrada con un retardo en tiempo multiplicada por la función de transferencia del sistema $H(\omega)$ [14].

En general, una señal de salida o respuesta $e(t)$ de un sistema (con condiciones iniciales cero) o LTI (lineal invariante en el tiempo), cuya respuesta al impulso es $h(t)$ a una señal de entrada o de excitación $o(t)$, es la convolución [1].

$$e(t) = h(t) * o(t) \quad (1.6)$$

En el dominio de la frecuencia, bajo el teorema de convolución, la transformada de Fourier de la convolución de dos funciones es igual a la multiplicación de las transformadas de Fourier de las dos funciones:

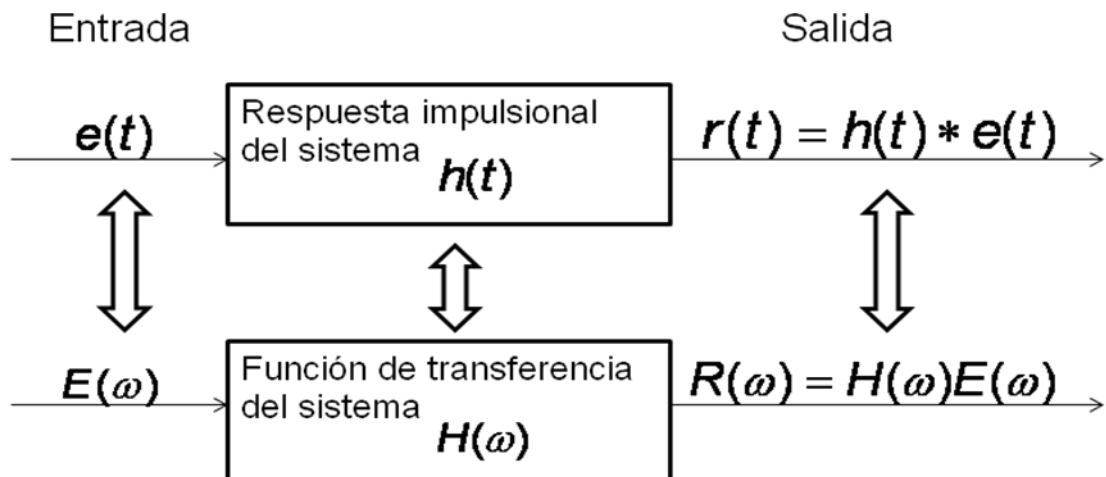
$$\mathcal{F}(f * g) = (\mathcal{F}(f)) \cdot (\mathcal{F}(g)) \quad (1.7)$$

Donde \mathcal{F} denota la transformada de Fourier, por lo tanto la expresión 1.6 se puede re-escribir de la siguiente forma,

$$E(\omega) = H(\omega) \cdot O(\omega) \quad (1.8)$$

La cantidad $H(\omega)$ define la función de transferencia del sistema. La función de transferencia es la transformada de Fourier de la respuesta al impulso $h(t)$ y relaciona la señal de salida con la señal de entrada, como se muestra en el esquema mostrado en la Figura 5.

Figura 5. Relaciones de entrada - salida en los dominios del tiempo y la frecuencia.



Fuente: Ambarkad, A., Procesamiento de señales analógicas y digitales [1].

De acuerdo a la relación 1.8, la función de transferencia se puede calcular a partir de la relación del espectro de las señales emitida y transmitida

$$H(\omega) = \frac{R(\omega)}{E(\omega)} \quad (1.9)$$

Otro método planteado por [14] para calcular la función de transferencia, viene dado por la expresión

$$H(\omega) = B(\omega) \cdot A(\omega) \cdot C(\omega) \quad (1.10)$$

Donde $B(\omega)$ es la función del patrón de radiación resultante de los patrones de radiación de las señales emitida y recibida para el rango de frecuencias de interés, $A(\omega)$ describe la pérdida de transmisión y es calculado numéricamente con un

coeficiente de absorción α , y $C(\omega)$ es la función característica del reflector y se puede asumir como una constante.

Para compensar la función de transferencia del sistema de medición se usa un procedimiento que permite filtrar la señal recibida con la inversa de la función de transferencia. Para una óptima reducción del ruido, Los trabajos realizados por H. Ruser y colaboradores [14] y Y. Murakami y colaboradores [11], proponen que el filtro inverso sea combinado con un filtro de ruido. La combinación que ofrece una distorsión mínima en la señal y una máxima reducción del ruido es el filtro de Wiener. El filtro de ruido está dado por la relación entre el espectro de potencia de la señal y la suma de los espectros de potencia de la señal y el ruido. Después de calculado el espectro de potencia de la señal, el filtro de Wiener puede ser calculado por

$$I(\omega) = \frac{H^*(\omega) \cdot W(\omega)}{H(\omega) \cdot H^*(\omega) + \phi_s / \phi_n} \quad (1.11)$$

Donde $H^*(\omega)$ es el complejo conjugado de la función de transferencia, $W(\omega)$ es una función ventana que selecciona el rango de frecuencias de interés, ϕ_s y ϕ_n son las densidades del espectro de potencia de la señal y el ruido respectivamente, y ϕ_s / ϕ_n corresponde a la relación señal – ruido. Si la relación señal - ruido es alta, el filtro tiende a ser un filtro de deconvolución puro. Si la relación señal – ruido es baja, el filtro es un filtro adaptativo. En algunos casos, debido al rango de frecuencias de interés, esta relación señal – ruido puede ser asumida como constante para todas las direcciones de propagación y frecuencias.

En la Figura 6 se muestra un ejemplo típico de la eco-señal de salida $e(t)$ y su respuesta en frecuencia (transformada de Fourier de la eco-señal) $E(\omega)$. La

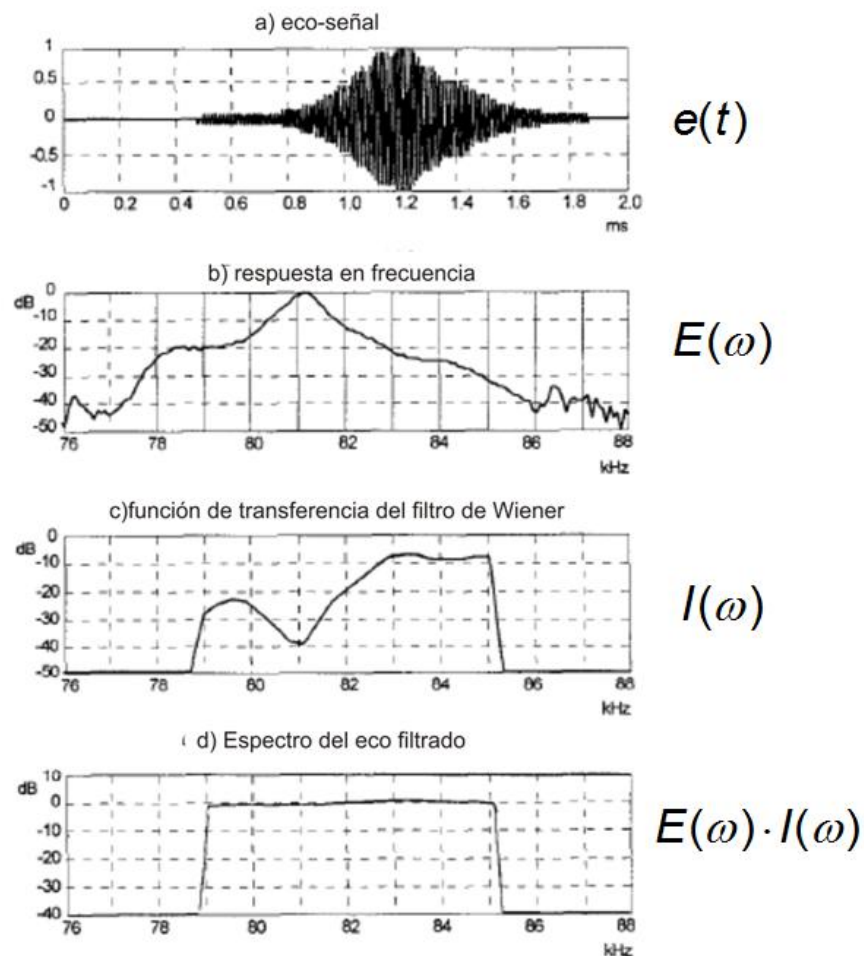
Figura 6c muestra la función de transferencia del filtro de Wiener y en la Figura 6d se presenta el espectro del eco filtrado.

El espectro del eco filtrado está descrito por la expresión

$$E(\omega) \cdot I(\omega) \quad (1.12)$$

Donde $E(\omega)$ es la transformada de Fourier del eco – señal de entrada y $I(\omega)$ es la función de transferencia del filtro de Wiener.

Figura 6. Evaluación del filtro de Wiener.



Fuente: [14].

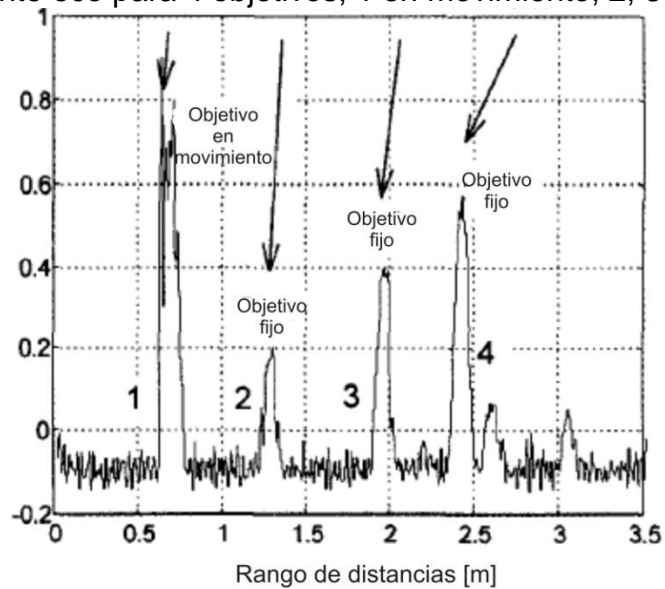
Calculando la transformada de Fourier inversa de la expresión (1.12) se obtiene

$$\mathcal{F}(E(\omega) \cdot I(\omega)) = e(t) * i(t) \quad (1.13)$$

$$\hat{o}(t) = e(t) * i(t)$$

Donde $i(t)$ Corresponde a la respuesta impulsional. Como resultado de este procedimiento se obtiene una señal $\hat{o}(t)$, la cual es una señal que proporciona información acerca de la presencia de uno (o varios objetivos en el caso mencionado como ejemplo) y la distancia a la que se encuentra respecto al medidor. En la Figura 7 se muestran los resultados de este procedimiento, donde se detectan las posiciones de 4 objetivos, uno de los cuales está en movimiento y los tres restantes están en posiciones fijas. Es decir, del proceso de convolución se obtiene una señal con envolvente aguda, indicando la presencia en la señal recibida, de objetos. Identificar un objeto en movimiento se realiza si la envolvente se altera, ensanchándose.

Figura 7. Envolvente eco para 4 objetivos, 1 en movimiento, 2, 3 y 4, fijos.



Fuente: [14].

2.4 RESOLUCIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE MEDICIÓN DE DISTANCIAS CON ULTRASONIDO

Los dispositivos comerciales utilizados para medir distancias con ultrasonido a nivel industrial tienen una resolución de 0.01 [m] [6], [16]. El circuito medidor de distancia UCM-R4OK1 mostrado en la figura 2, presenta una serie de características que se muestran en la tabla 1. Una de estas características es el valor de la resolución.

Tabla 1. Características circuito medidor de distancia UCM-R4OK1

Características	MDU
Tipo de Sensor	Ultrasónico de reflexión
Frecuencia	40KHz
Distancia mínima	25 cm
Distancia máxima	300 cm
Resolución	1 cm
Sensibilidad	Detecta un objeto de diámetro 8cm a < 1m
Tensión de entrada	9V
Consumo de corriente	60mA tip.

FUENTE: Javier Zamudio. A.G Electrónica S.A. de C.V. [15].

Figura 8. Medidores de distancia a) CP-3007 b) CP-3009



Fuente: Control Measurement System CMS Metrology, USA [6].

Como una forma de verificar la información entregada anteriormente, se muestran las características de dos dispositivos medidores de distancia que utilizan ultrasonido (Ver Figura 8).

3 ESQUEMA DE GENERACIÓN DE LA SEÑAL EMPLEANDO ULTRASONIDO

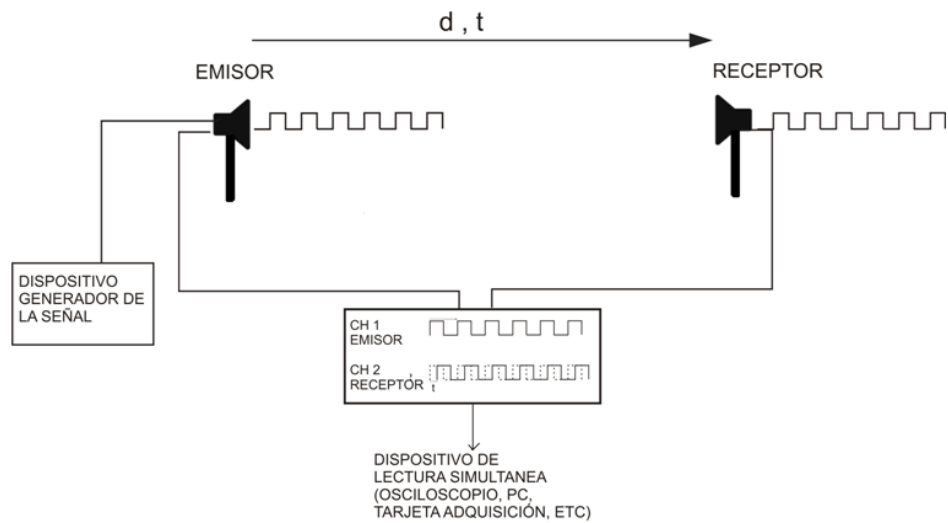
En este capítulo se hará una descripción del dispositivo de medida utilizado para el desarrollo de este trabajo, en qué consiste el proceso de codificación M-Secuencia y como se está aplicando para generar la señal de excitación eléctrica enviada al emisor del ultrasonido, el funcionamiento del dispositivos generador de la señal y por ultimo como se realiza el almacenamiento de las señales emitida y recibida.

3.1 DISPOSITIVOS DE MEDIDA: TRANSDUCTORES ULTRASÓNICOS

El funcionamiento de nuestro medidor que utiliza señales de ultrasonido consiste en la utilización de dos dispositivos piezoeléctricos, emisor (o transmisor) y receptor.

Su funcionamiento básico consiste en la emisión de un tren de pulsos. El transductor emisor es el encargado de dicha emisión, este pulso viaja una distancia d en un tiempo t , hasta el transductor receptor, como se muestra en la Figura 9 [5].

Figura 9. Esquema de funcionamiento medidor de distancia con ultrasonido.



Para esto, el dispositivo emisor debe excitarse con una señal adecuada en amplitud y frecuencia, y el dispositivo receptor transformará todas las ondas de presión ultrasónica que lleguen a excitarla. Es decir, los dispositivos transductores convierten ondas de energía mecánica en energía eléctrica y viceversa. El efecto piezoeléctrico bajo el cual trabajan estos dispositivos consisten en que ciertos cristales cuando se tensionan se polarizan eléctricamente y generan un voltaje eléctrico entre las superficies opuestas. Este efecto microscópico se origina por la propiedad de simetría de algunos cristales [8]. Algunos ejemplos de materiales piezoeléctricos que se encuentran en el mercado son los cristales de cuarzo, los cristales de sulfato de Litio y las cerámicas polarizadas.

Los cristales de cuarzo poseen características de estabilidad térmica, química y eléctrica, se consideran menos eficientes como generadores de energía acústica; los cristales de sulfato de Litio son considerados receptores eficientes debido a la facilidad de obtener una amortiguación acústica óptima, lo que mejora el poder de resolución; y las cerámicas polarizadas las cuales son consideradas como generadores eficientes de energía ultrasónica cuando operan a bajos voltajes de excitación [8].

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron los transductores ultrasónicos de referencias T4016 y R4016, de la empresa DYNAMO ELECTRONICS, mostrados en la Figura 10 y las características principales de cada transductor se presentan en la Tabla 2.

Figura 10. Transductores Ultrasónicos T4016 y R4016.

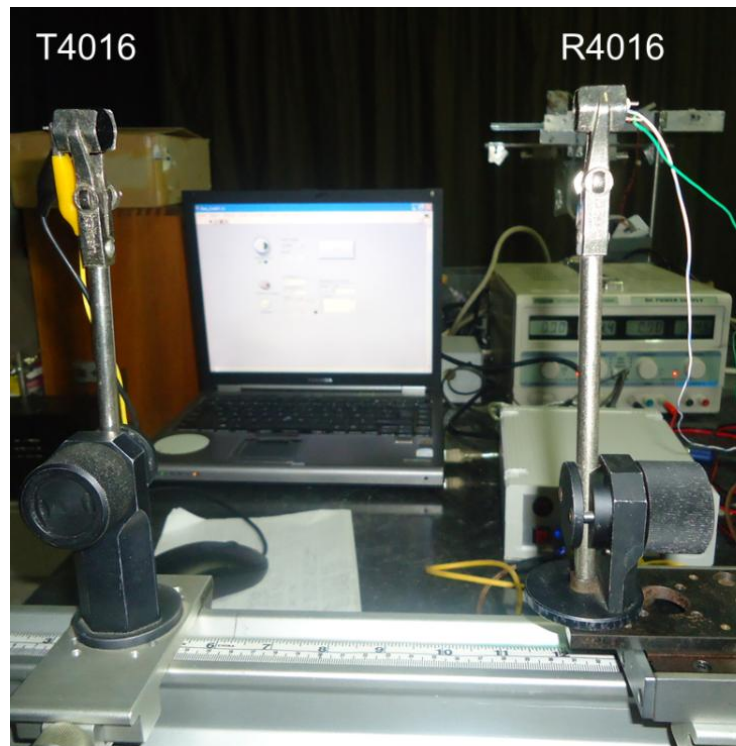


Tabla 2. Características Transductores Ultrasónicos.

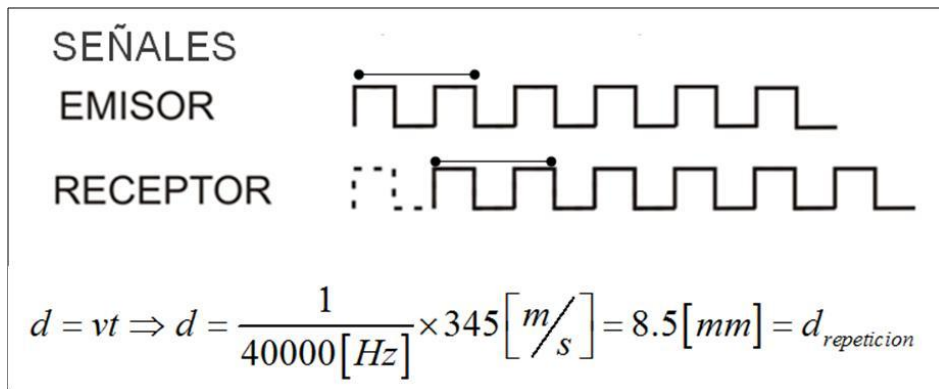
Características Transductores Ultrasónicos
--

T4016 Transmisor	R4016 Receptor
Frecuencia resonante FR =40.1 [KHz]	Frecuencia resonante FR =40.1 [KHz]
Capacitancia a 1khz C=2090 [pF]	Capacitancia a 1khz C=2190 [pF]
Nivel de potencia a 40Khz 122.2 [dB]	sensibilidad a 40Khz -57.3 [dB]

3.2 PROCESO DE CODIFICACIÓN M-SEQUENCE (M-SECUENCIA)

Debido principalmente a la distancia d entre emisor y receptor, las señales digitalizadas presentan un corrimiento ΔT . Así, empleando una frecuencia de base de 40 KHz y usando la velocidad aproximada de 345 m/s, un corrimiento d de 8.5 mm, equivalente a un corrimiento de un pulso del tren de ondas. Esto implica que si el emisor envía un tren de pulsos de 40 KHz, el dispositivo solo podrá medir en un rango de 0 a 8.5 mm. Valores superiores generan un corrimiento temporal superior a un pulso, imposibilitándose determinar el número entero de corrimientos en pulsos de los dos trenes de onda. Con el fin de determinar distancias superiores a un pulso, se emplea un proceso de codificación en amplitud que permita identificar el número entero de corrimiento en pulso de los dos trenes. Este caso se muestra en la Figura 11

Figura 11. Corrimiento temporal de un ciclo.



Para el desarrollo de este trabajo se utilizó la modulación en amplitud por M-Secuencia, también conocida como secuencia de longitud máxima (*Maximum Length Sequence*). M-Secuencia es una secuencia binaria pseudo-aleatoria de bits generada utilizando un registro de retroalimentación lineal de desplazamiento (*Linear Feedback Shift Register*), llamado así debido a que es periódico y reproduce todo tipo de secuencia binaria [4] , [12]. La longitud de la señal M-sequence depende de la longitud de registro n. Para una longitud de n-registros se produce una secuencia de longitud máxima que viene dada por la ecuación

$$L = 2^n - 1 \tag{2.1}$$

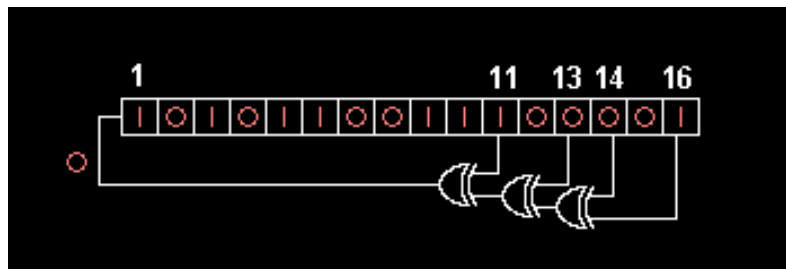
Esta secuencia es obtenida realizando la operación de retroalimentación con una operación lógica Exclusive OR (XOR), aplicada en una operación bit a bit.

Tabla 3. Representación de la operación Exclusive OR (XOR).

Bit	XOR	Bit	res
1	⊕	1	0
1	⊕	0	1
0	⊕	1	1
0	⊕	0	0

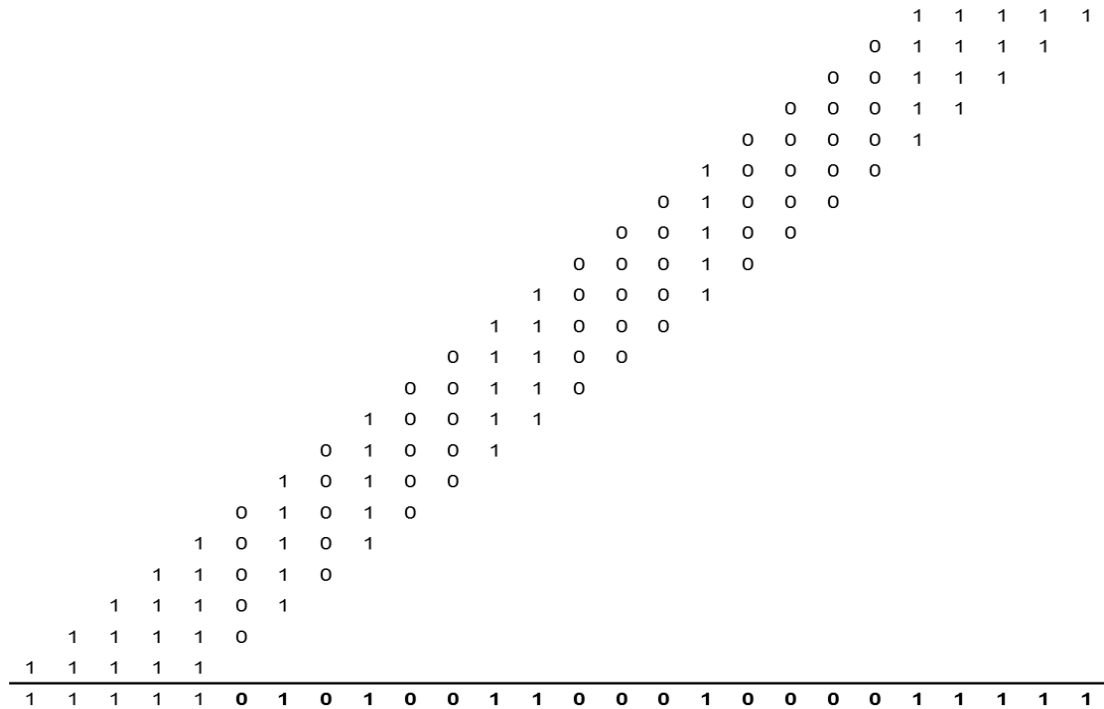
La operación Exclusive OR se realiza sobre dos de los elementos (bits) que componen la longitud del registro. Puede ser ejecutada sobre el último elemento del registro y el penúltimo, o sobre el último elemento y cualquiera de los otros elementos del registro o una combinación en las operaciones, hasta obtener la longitud máxima de registro. La Figura 12 muestra un esquema de cómo se realiza la operación XOR. El valor inicial del registro puede estar compuesta por una serie de n bits 1, n bits 0 o la combinación de bits unos y ceros.

Figura 12. Esquema correspondiente a la operación XOR.



La Figura 13 muestra la secuencia obtenida para un registro de $n=5$ haciendo la retroalimentación con un XOR entre los dos últimos bits. El resultado de la operación XOR entre estos dos elementos se retroalimenta en la primera posición del registro, desplazando el registro hacia la derecha, conservando siempre la misma longitud. Ésta operación se repite hasta recuperar el registro con valor inicial. De esta manera se obtiene para el caso indicado 21 palabras de $n=5$ bits sin repetirse. A partir de la palabra 22 se repite la misma secuencia. Al ubicar la secuencia de palabras de manera vertical y eliminando los bits repetidos se obtiene una serie de 21 bits consecutivos sin repetirse e indicando en la parte inferior de la figura. Esta serie corresponde a la M-Secuencia para $n=5$ haciendo el XOR entre la última y penúltima posición del registro. La M-secuencia tiene la característica de no poseer $m=5$ bits repetidos. De igual forma, identificando $n=5$ bits se encuentra la posición de la palabra en la M-Secuencia. Así, obteniendo la palabra 01001 corresponde a la octava palabra de la M-Secuencia.

Figura 13. Operación XOR para una longitud de registro $n=5$.



Esta característica es ampliamente utilizada en telecomunicaciones ya que identificado n bits en secuencia, se puede determinar la posición de la palabra dentro del código. Esta característica fue implementada en la evaluación preliminar del dispositivo de medida por ultrasonido.

Para el caso correspondiente a este trabajo la longitud de registro utilizada es $n=8$, está compuesta por ocho bits uno y la operación XOR se realizó sobre el último y el antepenúltimo elemento del registro, obteniéndose una longitud de registro total $L = 217$, el cual representa un vector fila de 217 elementos. La secuencia obtenida se muestra a continuación.

Figura 14. M-Secuencia de 217 bits calculada a partir de una longitud de registro $n=8$.

1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0
0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1
0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1
0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	1
1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1
1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0
1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0
0																	

La M-Secuencia es empleada para modular la amplitud de una señal portadora de 40 KHz y perfil rectangular. Con el fin de reducir la influencia de varios bits cero seguidos de la m-sequence, cada bit corresponde a 120 periodos completos ($\frac{120}{40000} \text{ s} \Rightarrow 3 \text{ ms}$). Para el bit 1 los primeros 15 periodos completos poseen amplitud A y el resto tiene amplitud cero. Para el bit cero la amplitud es cero para los 120 periodos completos. La Figura 15 muestra la equivalencia de los bits 0 y 1 de la M-Secuencia empleada. La Figura 16 muestra la señal de excitación eléctrica enviada al emisor del ultrasonido. El dispositivo electrónico de excitación del emisor ultrasonido envía de manera continua los 217 bits de la M-Secuencia mostrados en la figura 14. De esta manera la señal de excitación tiene un periodo de $217 \times 3 \text{ ms} = 651 \text{ ms}$, que equivale a una distancia de $\Delta x = 345 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0.651 \text{ s} \cong 224.6 \text{ m}$. Es decir, ubicando el emisor y el receptor en un rango de hasta 224.6 m el dispositivo podría medir la distancia.

Figura 15. Representación de los bits uno y cero.

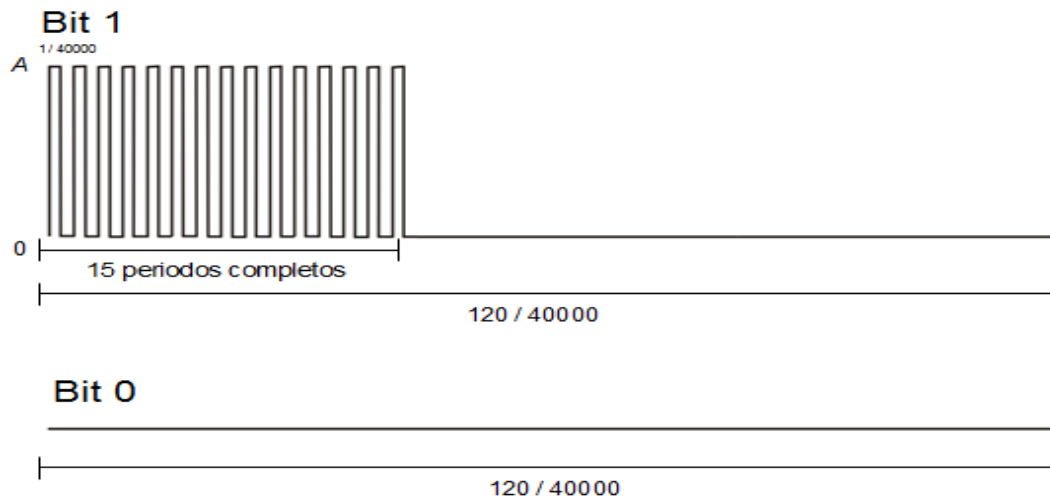
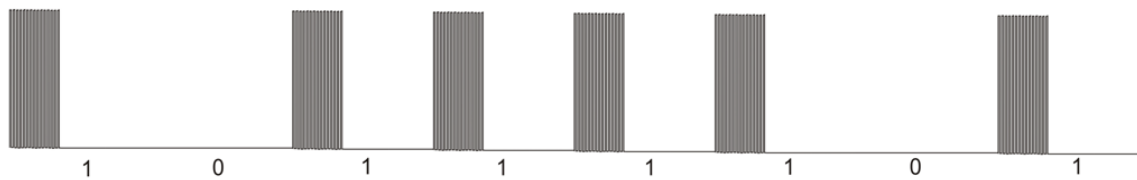


Figura 16. Señal de excitación eléctrica enviada al emisor del ultrasonido.



En la Figura 16, cada bit tiene una duración en tiempo de 3 ms y en total esta señal de excitación corresponde a una duración en tiempo de 21 ms de lectura.

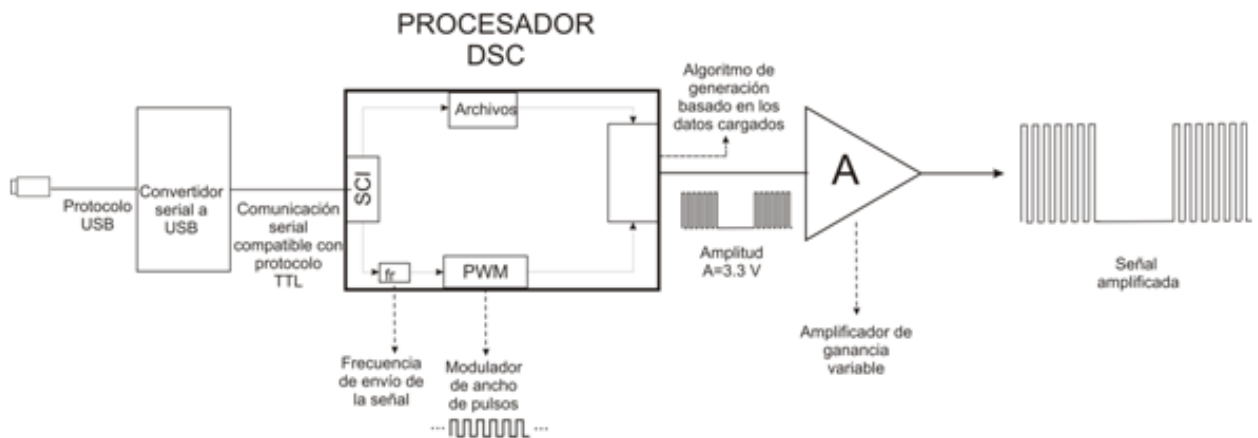
3.3 DISPOSITIVO ELÉCTRICO GENERADOR DE LA SEÑAL

En esta sección se muestra el dispositivo implementado para excitar el emisor de ultrasonido. El dispositivo empleado para generar la señal es el generador de códigos GEN_CODE*. Este dispositivo es un sistema de generación de señal de frecuencia variable (500Hz a 40kHz) y amplitud variable (3V – 36V), basado en secuencias binarias, que son cargadas por el usuario. El hardware del sistema está conformado por el procesador DSC (Digital Signal Controller) que a través del

* El dispositivo generador de señales GEN_CODE y la interfaz de trabajo fue diseñado y construido por el Ingeniero Electrónico SAMUEL ALBERTO JAIMES, Universidad Industrial de Santander.

puerto serie recibe la M-Secuencia y la información necesaria para la generación de la señal por el puerto de salida del procesador se genera la señal que posteriormente es amplificada y potencializada. En la Figura 17 Se presenta un esquema del hardware del dispositivo GEN_CODE diagrama en bloques para explicar el funcionamiento interno del procesador y en la Figura 18 se muestra el dispositivo electrónico generador de la señal GEN_CODE.

Figura 17. Esquema del Hardware del dispositivo GEN_CODE.



El procesador DSC (controlador de señales digitales) internamente tiene una interface de comunicación serial SCI (Serial Communication Interface) que permite la entrada y salida de los datos de manera alternada. Para la entrada de los datos el procesador tiene por un lado un módulo que almacena la frecuencia que se está cargando al dispositivo para el envío de la señal, el cual esta comunicado con un módulo PWM. El módulo PWM es un modulador de ancho de pulsos y es el encargado de generar una señal de referencia que tiene una amplitud de $A=3.3\text{ V}$ con una frecuencia igual a la frecuencia que se introduce para el envío de la señal (en este caso en particular esta frecuencia es de 40 KHz). Con base en la señal de referencia el genera la secuencia de acuerdo al orden en que se envía esta. También tiene un modulo Archivo donde se almacenan los datos de entrada al procesador. Los módulos Archivo y PWM están comunicados con la interface de

comunicación serial. Al algoritmo de generación basado en los datos cargados llega la información en datos de los módulos Archivo y PWM. Allí se registran los cambios introducidos en los datos cargados y la salida de este modulo es la señal modulada por M-Secuencia. Esta señal de salida tiene la misma amplitud de la señal de referencia. Como se necesita una señal amplificada, esta señal de salida del algoritmo de generación pasa por un amplificador de ganancia variable. La señal de salida después de la etapa de amplificación es una señal que puede tener una amplitud máxima de 36 v, enviada al transductor emisor.

Para la salida de los datos del procesador, el módulo SCI establece una comunicación serial con un convertidor serial a USB, donde se establece finalmente por medio del protocolo USB la salida hacia el puerto USB del computador portátil desde el cual se van a enviar los datos. La comunicación serial entre la interface de comunicación SCI es compatible con el protocolo TTL. El protocolo TTL establece que para valores iguales o superiores a 2 voltios y hasta el valor de 3.3 voltios, a la información de entrada se le asigna un orden lógico de 1. Si los valores registrados se encuentran por debajo a 0.8, se asigna un valor de orden lógico cero. Los datos que estén en el rango de los valores mayores a 0.8 y menores a 2 no los reconoce.

Figura 18. Dispositivo electrónico generador de la señal GEN_CODE.



Este dispositivo es programado desde un computador portátil vía puerto USB. El procesador del dispositivo está programado para cargar la secuencia que define la M-Secuencia y ejecutar los comandos de inicio y parada de la generación de la señal. Los archivos cargados pueden tener cualquier nombre y deben ser almacenados en formato texto. La secuencia de bits de la M-Secuencia se agrupa por bytes* y se convierten a ASCII**, como se indica en la Figura 19. Para operarlo desde un computador portátil se utiliza la ventana interfaz, diseñada y operada utilizando el software LABVIEW mostrada en la Figura 20.

Figura 19. Ejemplo conversión de la secuencia binaria a caracteres ASCII

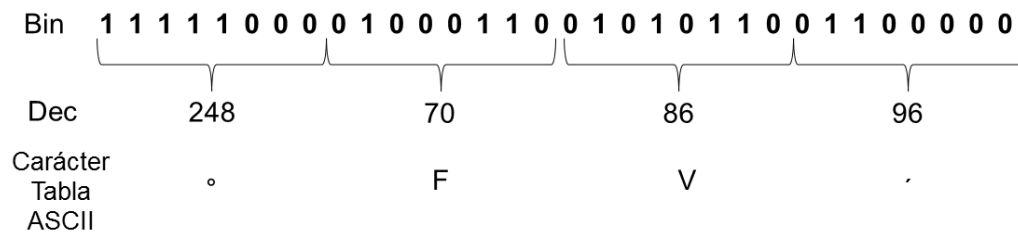
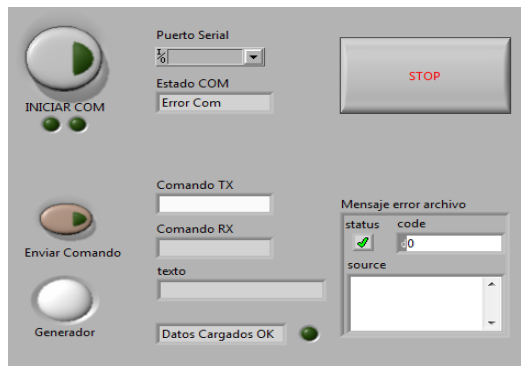


Figura 20. Interfaz de control GEN_CODE.

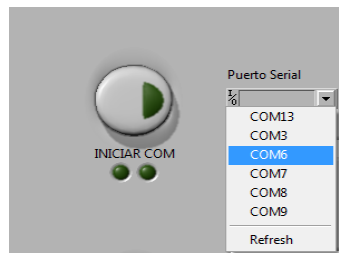
* 1 Byte = 8 bits.

** ASCII acrónimo inglés de American Standard Code for Information Interchange o Código Estándar Estadounidense para el Intercambio de Información, es un código de caracteres basado en el alfabeto latino y es utilizado para representar textos y para el control de dispositivos que manejen texto. Tabla disponible en <http://www.asciitable.com/>.



El dispositivo tiene un botón para detener la señal (stop) y un botón para el envío de comandos e indicadores del estado de comunicación. Para el manejo de este dispositivo se arranca por identificar el puerto que corresponde al generador. Para esto el usuario se dirige al administrador de dispositivos. Después de identificado el puerto, se utiliza el pulsador INICIAR COM. Este pulsador permite abrir el puerto correspondiente al dispositivo y establecer la comunicación con el dispositivo. Para este caso, el puerto de comunicación correspondiente al dispositivo es el puerto serial COM 8

Figura 21. Selección del puerto serial.



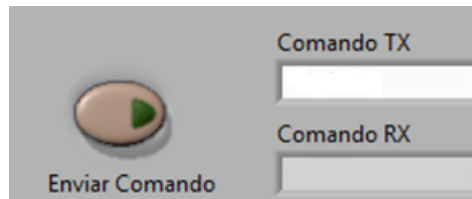
Una vez iniciada la comunicación, en la casilla Estado COM se muestra la respuesta de la conexión. Cuando aparece GEN_CODE y los LED indicadores encienden y apagan automáticamente, indican una comunicación exitosa con el dispositivo

Figura 22. Comunicación exitosa con el dispositivo generador GEN_CODE.



Para cargar los datos se utiliza la parte de la interfaz mostrada en la figura 23.

Figura 23. Parte de la interfaz donde se cargan los datos.

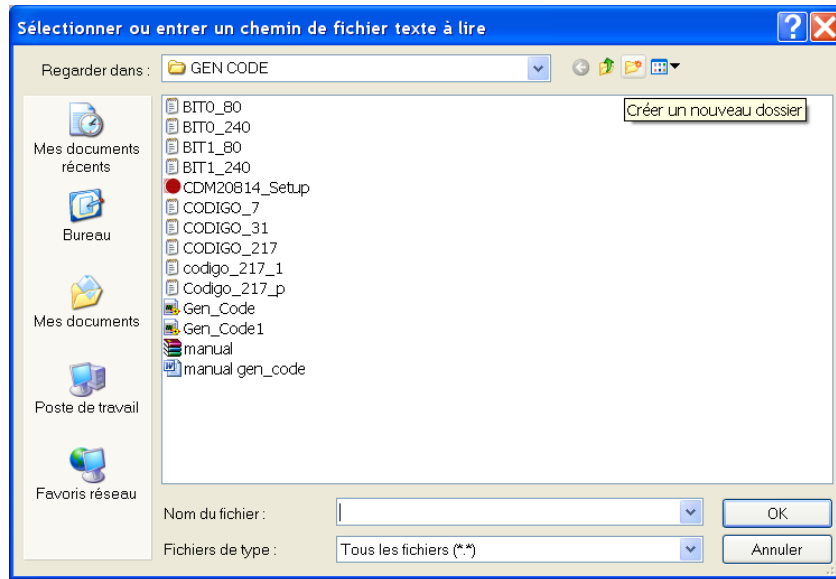


El generador permite definir el bit uno, el bit 0 y la secuencia de bits de la M-Secuencia, estos datos son almacenados en los registros b, c, y a del microprocesador del dispositivo respectivamente.

Para definir los datos a cargar se deben enviar al generador 3 comandos: *lob240 (carga el bit 1); *loc240 (carga el bit cero) y *loa32 (archivo generador que contiene la M-Secuencia calculada L=217). Los valores 240 y 32 corresponden al número de datos que se cargan al dispositivo.

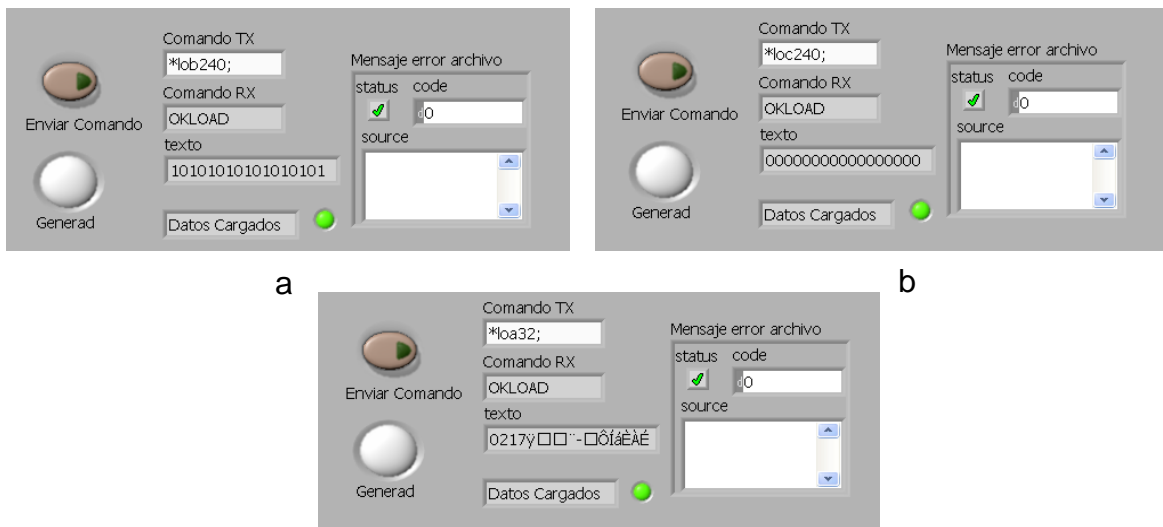
Después de escritos cualquiera de los tres comandos mencionados anteriormente, se pulsa el botón Enviar Comando. Al pulsar este botón, comienza en proceso de carga. Se abre la ventana para abrir el archivo que se quiere cargar.

Figura 24. Ventana para seleccionar el archivo que se quiere cargar.



Cuando se cargan los archivos correspondientes a los comandos, se observara que en el espacio Comando RX se recibirá OKLOAD y el LED ubicado al lado derecho enciende y queda fijo, indicando que los datos han sido cargados satisfactoriamente.

Figura 25. Datos cargados satisfactoriamente para los comandos a)*lob240; b)*loc240; y c)*loa32;



c

La frecuencia seleccionada para emitir las señales es $f=40000$ Hz. Para la selección de la frecuencia, en el espacio Comando TX se digita el comando *fc40000; y se pulsa el botón Enviar Comando. Una vez el equipo ha programado la frecuencia, se observara que en el espacio Comando RX se recibirá OKFRE.

Finalmente para generar la secuencia en el espacio Comando TX se digita el comando *gen; y se pulsa el botón Enviar Comando. Una vez se inicie la generación de la secuencia programada, se observara que en el espacio Comando RX se recibirá OKGEN.

FORMATO DE LOS DATOS

Como el dispositivo se está operando desde un computador portátil, los archivos debe ser formato texto (.txt), puede llevar cualquier nombre. El tamaño de la secuencia se suministra en los tres comandos: *lob240; *loc240; y *loa32;. El archivo correspondiente al último comando debe llevar en su contenido un encabezado de 4 caracteres que indican la longitud de la secuencia, los restantes 28 caracteres corresponden a la secuencia binaria obtenida ($L=217$), convertida a bytes, y posteriormente a caracteres ASCII.

3.4 SISTEMA DE ADQUISICIÓN

En la etapa de adquisición se utilizó la tarjeta de adquisición National Instruments NI-PCI6251, que se muestra en la figura 26. Esta es una tarjeta de adquisición de datos DAQ, que tiene dos salidas analógicas de 16 bits, 16 entradas analógicas, con capacidad de adquisición de hasta 1GHZ. Esta tarjeta se instalo en la Unidad Central de procesamiento CPU, desde la cual por medio de un software interactivo National Instrument Measurement and Automation Explorer se realizaba la verificación y funcionamiento de la tarjeta.

Esta tarjeta se conectó al bloque conector NI SCC 68, mostrado en la figura, blindado para realizar interfaz con las señales de E/S (Entrada/Salida) al dispositivo de adquisición de datos.

Figura 26. a) Tarjeta de adquisición NI PCI 6251. b) Bloque conector NI SCC 68



a) NI PCI 6251



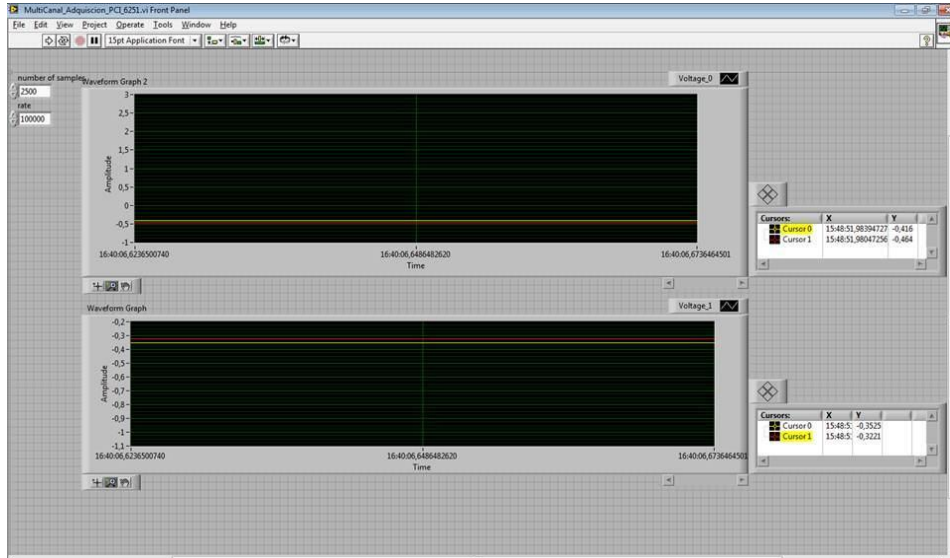
b) NI SCC 68

Para la adquisición correcta de las señales, el transductor receptor se conectó a un sencillo amplificador de 5 volts, alimentado con una fuente de alimentación PROTEK DF1731SB3A.

El dispositivo inicia su funcionamiento emitiendo la señal codificada, la cual es recibida por el transductor receptor después de que la onda viaje una distancia D de separación entre los transductores y un tiempo t . Las señales (emitida y transmitida) son almacenadas utilizando la interfaz* diseñada y operada utilizando el software LABVIEW, que se muestra en la Figura 27

* Interfaz desarrollada por Dr. Jaime Enrique Meneses Fonseca. Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales. Universidad Industrial de Santander

Figura 27. Interfaz de adquisición de las señales.



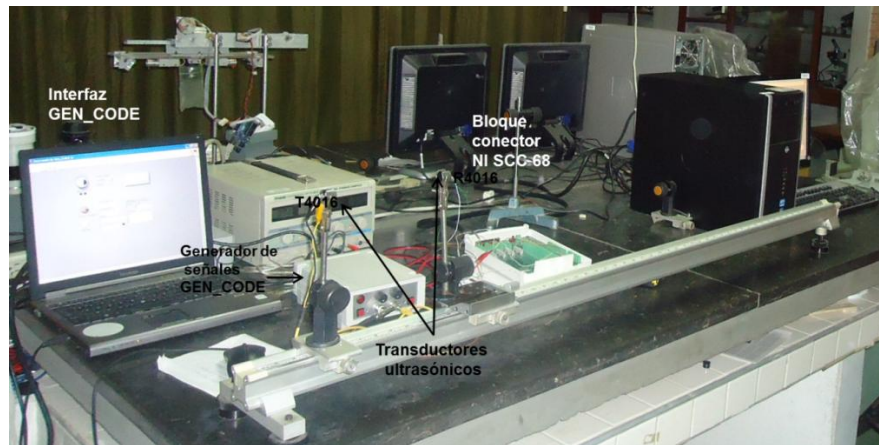
Esta interfaz permite seleccionar el número de muestras con el cual se quiere trabajar y la frecuencia de muestreo. En la parte Superior derecha de la interfaz se encuentran las casillas. En la primera casilla se escribe el número de muestras, en la segunda casilla se escribe el valor de la frecuencia de muestreo. Para el desarrollo de este trabajo de investigación se escogió un numero de muestras $M = 6750$ y una frecuencia de muestreo de $f_m = 250000$ Hz. Permite también la visualización en tiempo discreto de las señales emitida y transmitida, debido a que posee visualizadores para cada canal. El visualizador ubicado en la parte superior corresponde a la lectura del canal 1 y permite mostrar la señal emitida por el transductor emisor y el visualizador ubicado en la parte inferior corresponde a la señal recibida por el transductor receptor

Todos estos elementos constituyen el montaje experimental empleado en el desarrollo en el trabajo de grado, el cual se muestra en las Figuras 28 y 29.

Figura 28. Montaje Experimental.

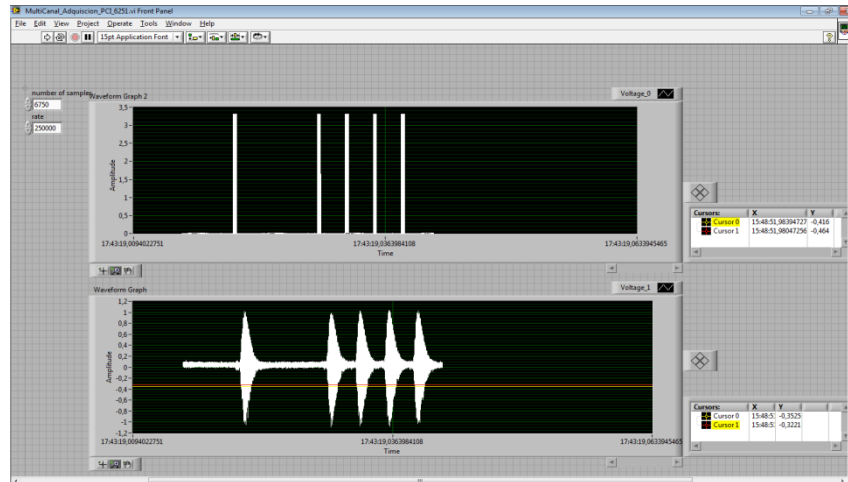


Figura 29. Montaje Experimental.



Empleando el montaje experimental que se muestra en las Figuras 28 y 29 los datos fueron tomados a una frecuencia de muestreo $f_m = 250000 \text{ Hz} = 250 \text{ KHz}$. y adquiriendo a un numero de muestras de $M = 6750$. El número de muestras se escogió con el fin de visualizar en la interfaz un total de 9 bits. El valor de la frecuencia de muestreo f_m se escogió con el fin de garantizar un número de 6 puntos de muestreo al interior de cada ciclo. La figura 29 muestra la interfaz de adquisición con un dato cargado, adquirido a una distancia $x = 7 \text{ cm}$.

Figura 30. Interfaz de adquisición con un dato cargado a $x = 7$ cm.



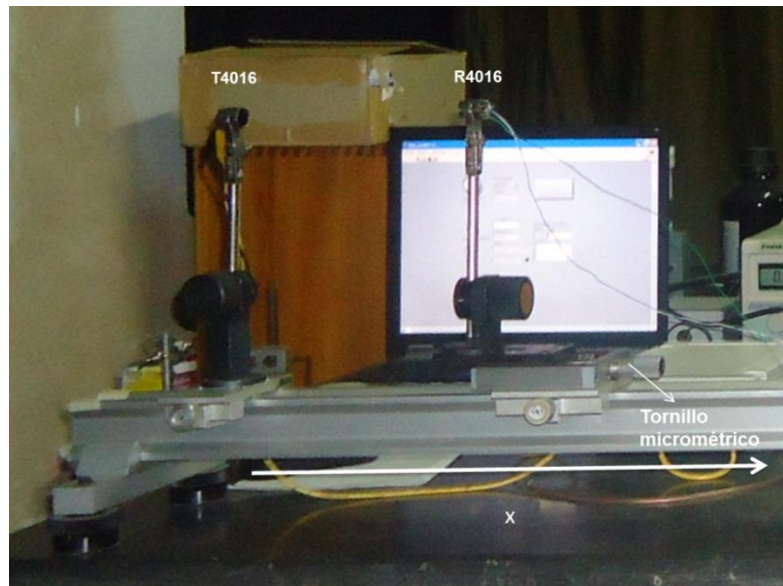
Los datos mostrados de los canales 1 y 2 son almacenados en un archivo de formato LabVIEW Measurement (.lvm), el cual es un formato de archivo basado en texto. Este formato permite que los datos sean exportados a MATLAB, para su posterior procesamiento.

4 PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES

En este capítulo se muestra el proceso de validación experimental para el esquema propuesto. Básicamente el proceso de verificación experimental consiste en evaluar variaciones conocidas de la distancia entre emisor y receptor a diferentes posiciones entre ellas. El objetivo consiste en verificar de manera preliminar si el esquema propuesto permite medir variaciones en la distancia entre emisor y receptor a resoluciones superiores a la resolución de los dispositivos comerciales.

Para realizar el procedimiento de adquisición de las señales del emisor y receptor, fue necesario ubicar los transductores ultrasónicos sobre un riel, con el fin de establecer la distancia x entre ellos. Se fijaron distancias de separación entre los transductores de $x = 4, 7, 10, 15, 20$ centímetros. Para cada distancia de separación se realizaron desplazamientos Δx , utilizando un tornillo micrométrico, el cual se encontraba ubicado en la base del transductor receptor, como se indica en la Figura 31.

Figura 31. Montaje de los transductores ultrasónicos.



Para cada distancia x de separación entre los transductores se realizaron 4 desplazamientos $\Delta x = 100, 200, 500$ y 1000 micras, ver Tabla 4.

Tabla 4. Relación de desplazamientos del transductor receptor con respecto al emisor.

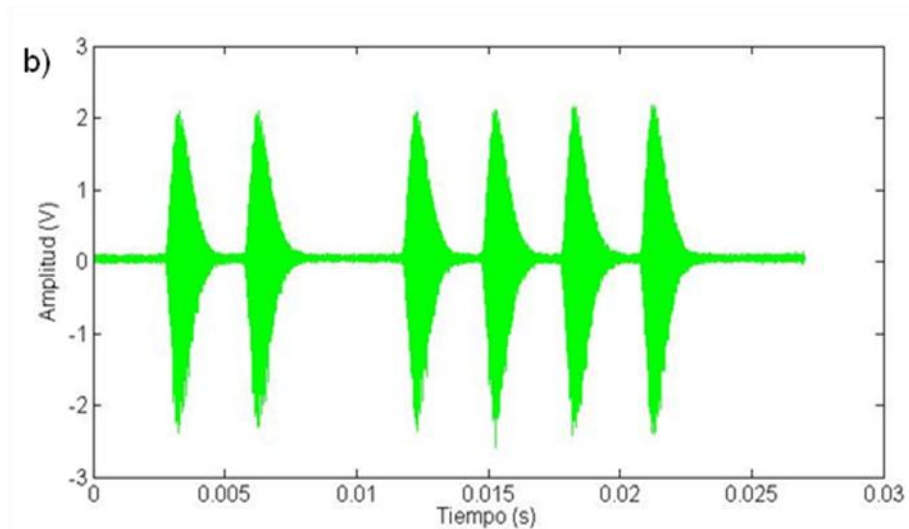
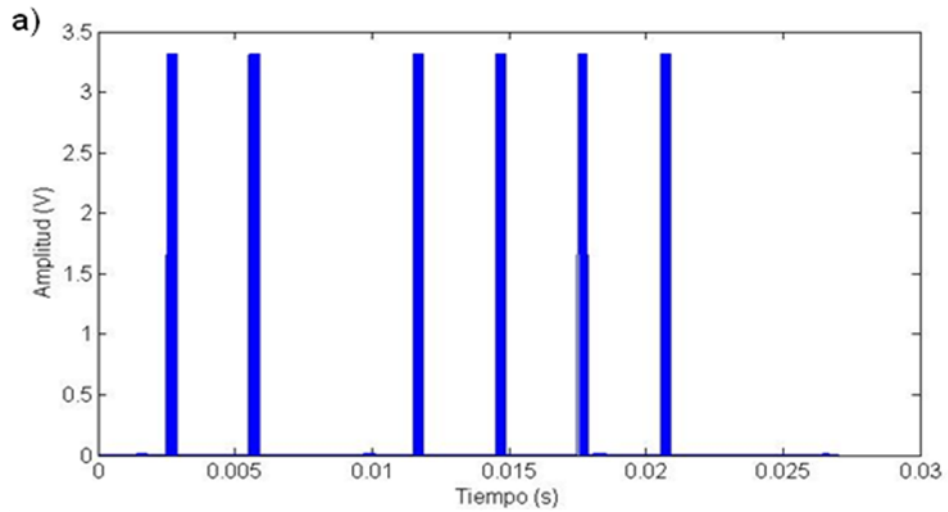
DISTANCIA DE SEPARACIÓN x [cm]	Incertidumbre [cm]	DESPLAZAMIENTOS ΔX [μm]	Incertidumbre [μm]
4,0	± 0.1	100 200 500 1000	± 10
7,0	± 0.1		± 10
10,0	± 0.1		± 10
15,0	± 0.1		± 10
20,0	± 0.1		± 10

Las distancias de separación x se midieron utilizando una cinta métrica. Ésta tiene un valor de incertidumbre en la medida de ± 1 [mm], y los desplazamientos se realizaron con un tornillo micrométrico, el cual presenta un valor de incertidumbre de ± 10 [μm]. Para una posición x se realizaron 10 incrementos consecutivos de Δx y para cada desplazamiento Δx se tomaron 5 adquisiciones. Los datos correspondientes a cada adquisición fueron almacenados en el formato LabVIEW Measurement (.lvm) y posteriormente exportados a MATLAB para su tratamiento.

En la figura 32 se muestra uno de los datos tomados a una distancia $x=4$ cm de distancia de separación entre los transductores. En la figura se observa que la señal de excitación del emisor tiene 6 bits en 1 y 2 bits en cero. Cada bit 1 tiene 15 pulsos completos de 40 KHz con amplitud de 3.3 voltios, es decir, hay 6 trenes de pulsos rectangulares. La señal del receptor posee 6 trenes de pulsos corridos en el tiempo con una envolvente que caracteriza la respuesta impulsional del sistema para este tipo de señal de excitación. En todas las señales muestreadas del receptor, la envolvente del tren de ondas presenta un comportamiento creciente y decreciente con tendencia exponencial, muy similar a respuestas capacitivas. Es importante mencionar que ningún tratamiento se le hace a la señal en el Hardware. En nivel de ruido de la señal del receptor tiene una amplitud máxima de 0.12 V y no cambia con la distancia, mientras que la amplitud de la envolvente se reduce con x .

Los datos fueron tomados a una frecuencia de muestreo $f_m = 250000$ Hz = 250 KHz, para garantizar un número de 6 puntos de muestreo al interior de cada ciclo y se adquirieron los datos con un número de muestras de $M = 6750$, este valor se escogió con el fin de visualizar en la interfaz un total de 9 bits tanto para el canal 1 como para el canal 2 y corresponden a un tiempo de adquisición de $t = 27$ ms

Figura 32. a) Datos del canal 1. b) Datos canal 2. Para una distancia $x = 4$ cm de separación entre los transductores.



La señal de excitación corresponde a la M-Secuencia para $n=8$ indicada en el capítulo anterior.

4.1 HIPÓTESIS PARA EL PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES

El procesamiento de las señales se basa en las siguientes hipótesis:

→ La señal de cada bit es independiente.

→ Para un tren de excitación de 15 pulsos rectangulares con amplitud constante, el sistema responde con una señal que depende de

$$(e(t) * r(t)) \bullet s(x) \quad (3.1)$$

La convolución corresponde a la señal de excitación con la respuesta impulsional y multiplicada por un factor $s(x)$ que es constante en el tiempo y variable con la distancia. Según lo anterior la forma de la señal no cambia excepto por un factor multiplicativo.

→ El retardo entre el emisor y el receptor depende de la distancia entre ellos y de la fase de la respuesta impulsional, que mide la inercia del sistema. Cambiar x no cambia la fase de la respuesta impulsional.

→ Para calcular el retardo entre las señales, se debe determinar la posición central de cada bit correspondiente.

→ La posición central de cada bit debe ser independiente de la amplitud de la señal y reducir la influencia del ruido en su determinación. Para la señal de emisor, el centro de cada bit corresponde al centro del tren número 8 de los 15 enviados por bit. Para calcular en centro del bit en la señal recibida se normaliza la envolvente y se corta la señal hasta tener un número fijo de trenes al interior. Así fijando 21 trenes al interior, el centro del bit corresponde al centro del bit número 11. La hipótesis básica consiste en asumir que la forma de la envolvente normalizada es la misma independiente de x , ya que se elimina la influencia de $s(x)$. Al buscar un número de trenes al interior es equivalente a cortar la señal envolvente normalizada en el mismo punto siempre. De esta manera el proceso es repetitivo.

4.2 FUNDAMENTOS DEL MÉTODO DE PROCESAMIENTO

Con base en las hipótesis anteriores, en el procesamiento se debe obtener la envolvente de cada bit e interpolar el centro del tren ubicado en el centro de $N=21$ trenes después del umbral para el cálculo de la envolvente.

El procesamiento se basó en el algoritmo de la transformada rápida de Fourier, enunciado por Mitsuo Takeda [15] y aplicado en el procesamiento de un patrón de franjas, cuya variable espacial es x .

En los sistemas de medición, la señal utilizada se puede expresar de la forma

$$g(x) = a(x) + b(x) \cos \left[2\pi f_o x + \phi(x) \right] \quad (3.2)$$

Donde $\phi(x)$ contiene la información deseada Y f_o es la frecuencia espacial del patrón de franjas. La ecuación 3.2 se puede re-escribir de la forma

$$g(x) = a(x) + b(x) \left[\frac{e^{i2\pi f_o x + i\phi(x)} + e^{-i2\pi f_o x - i\phi(x)}}{2} \right] \quad (3.3)$$

Que es equivalente a

$$g(x) = a(x) + c(x)e^{i2\pi f_o x} + c^*(x)e^{-i2\pi f_o x} \quad (3.4)$$

Con

$$c(x) = \frac{b(x)e^{i\phi(x)}}{2} \quad (3.5)$$

Donde * hace referencia al complejo conjugado.

Calculando la transformada de Fourier respecto a x de la ecuación (3.3) utilizando se obtiene como resultado

$$\mathcal{F}(f) = \mathcal{A}(f) + C(f + f_0) + C^*(f - f_0) \quad (3.6)$$

Donde f es la frecuencia espacial en dirección x . De la ecuación 3.5 se puede observar que $\mathcal{F}(f)$ tiene tres lóbulos separados que hace referencia a los espectros $\mathcal{A}(f)$, $C(f - f_0)$ y $C^*(f + f_0)$. El lóbulo central se ubica en $f = 0$ y contiene información de la transformada de Fourier de $a(x)$ y los lóbulos laterales se ubican en $\pm f_0$ y contiene información de la transformada de Fourier de $c(x)$. El objetivo consiste en calcular $b(x)$ y $\phi(x)$, que se encuentra en los lóbulos laterales. El lóbulo lateral ubicado en $f = f_0$ se filtra previamente para eliminar la variación de fondo no deseado (se remueve la frecuencia portadora) y ahora se tiene $C(f)$. Calculando la transformada inversa de Fourier se obtiene $c(x)$, es decir:

$$c(x) = \mathcal{F}^{-1}\{C(f)\} \quad (3.7)$$

$$c(x) = \frac{b(x)e^{i\phi(x)}}{2} \Rightarrow c(x) = \frac{b(x)}{2} \cos[\phi(x)] + i \frac{b(x)}{2} \sin[\phi(x)] \quad (3.8)$$

De esta forma, de la señal compleja obtenida de la transformada de Fourier inversa del lóbulo filtrado se calcula la fase con

$$\phi(x) = \tan^{-1} \frac{\text{Re}[c(x)]}{\text{Im}[c(x)]} \quad (3.9)$$

Y la amplitud con

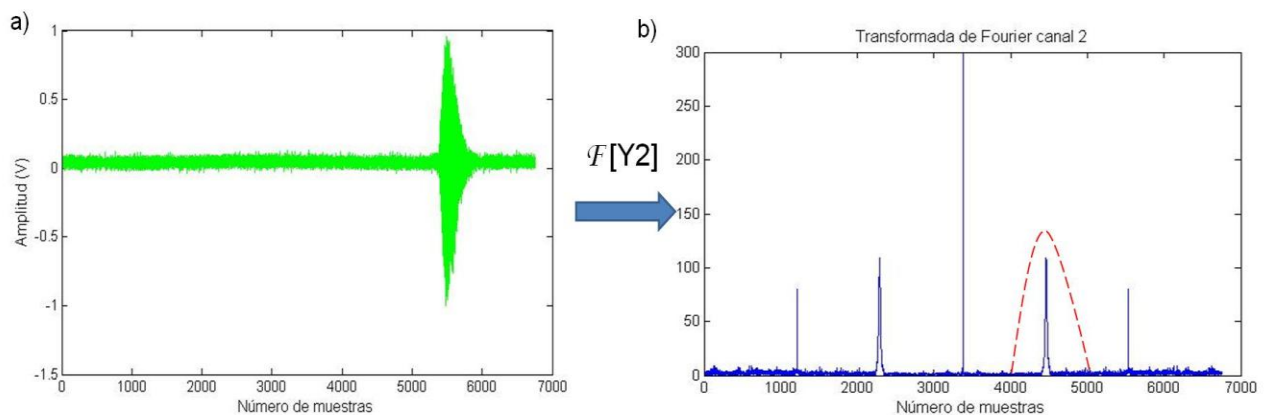
$$b(x) = 2\sqrt{\text{Re}^2[c(x)] + \text{Im}^2[c(x)]} \quad (3.10)$$

De esta manera $b(x)$ corresponde a la envolvente y $\phi(x)$ la fase de la señal.

4.3 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE PROCESAMIENTO

Según lo anterior, el procesamiento de la señal consiste en realizar la transformada de Fourier y multiplicar por la función de transferencia de un filtro pasa banda centrado en f_0 . La experiencia adquirida al interior del GOTS en el procesamiento de franjas indica que el ancho del filtro corresponde a $2/3 f_0$ y la ventana que reduce la influencia de la discontinuidad dada es una ventana de Hamming [13]. Para el cálculo del filtro se utiliza una señal con un bit en uno y el resto en cero. La Figura 33 muestra la señal recibida y su contenido espectral.

Figura 33. a) Canal 2, señal del receptor, b) espectro de Fourier del canal 2.



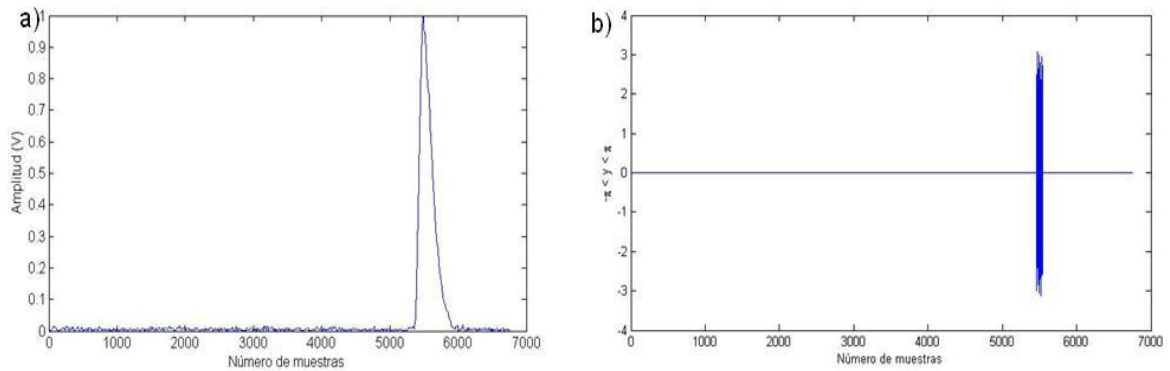
El filtro empleado esta dado por

$$H(x) = 0.54 - 0.46\cos(2\pi x) \quad (3.11)$$

Y centrado en f_0 . Al multiplicar la transformada de Fourier y hacer la transformada de Fourier inversa, se obtiene $b(x)$ y $\phi(x)$, mostrados en la Figura 34. La fase posee discontinuidades debido al uso de la función atan, expresada en la ecuación (3.9) que está calculada entre $\pm \pi$. Un valor de cero en la fase indica en centro de un máximo de la señal sinusoidal y la posición de discontinuidad de la fase donde

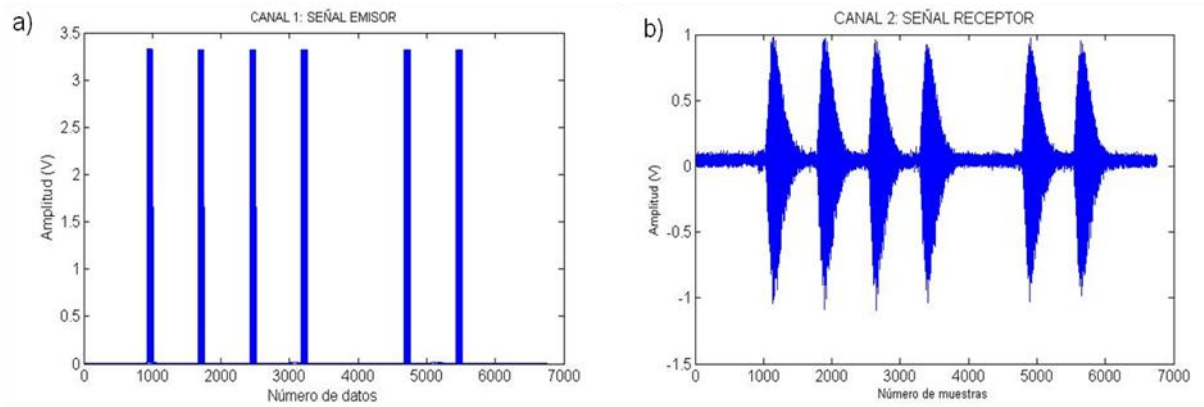
ocurre la transición $\pm \pi$ se presenta en el centro de un mínimo del perfil sinusoidal de la señal. Es decir, si se desea buscar un máximo de la señal del tren de pulsos se debe interpolar un cero de la fase discontinua.

Figura 34. a) Amplitud, b) fase obtenidos a partir de la transformada de Fourier inversa.



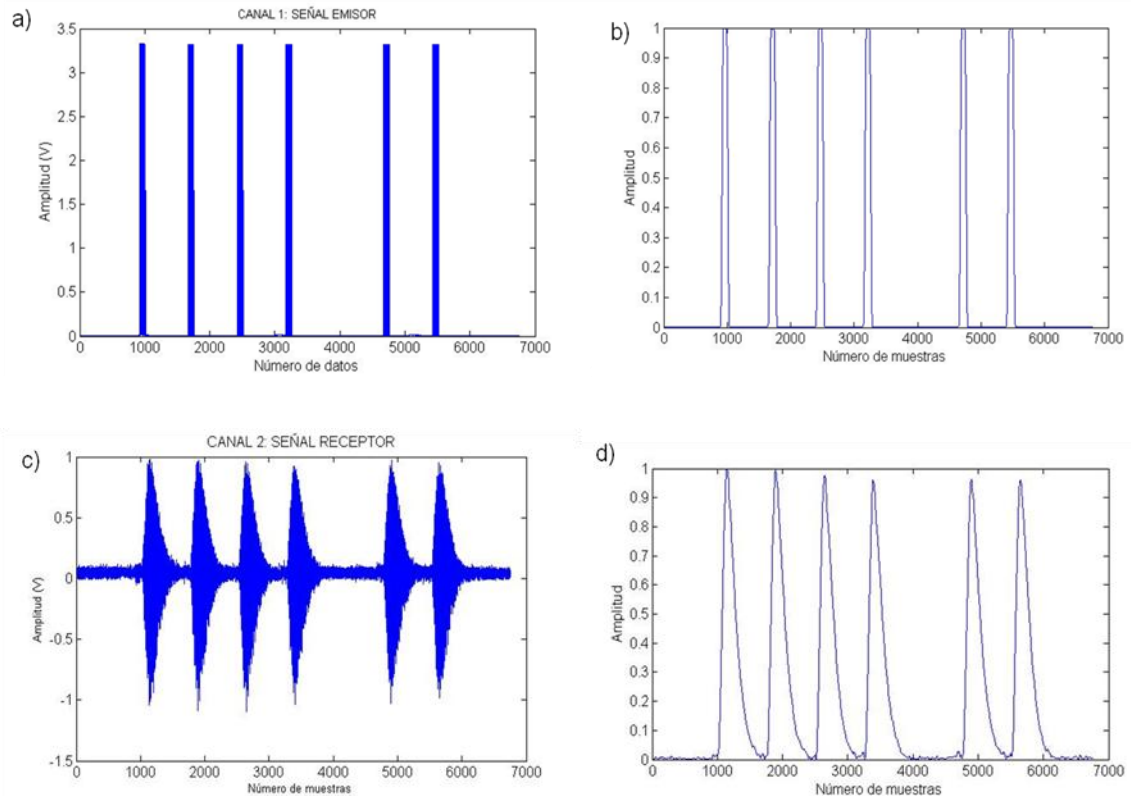
Como se mencionó anteriormente se adquirieron datos a distancias de $x= 4, 7, 10, 15$ y 20 cm de separación entre los transductores emisor y receptor. Por cada distancia se tomaron datos para desplazamientos del transductor receptor de $\Delta x= 100, 200, 500$ y $1000 \mu\text{m}$ y para cada desplazamiento Δx la adquisición fue de once datos, partiendo desde $\Delta x'=0$ (datos de referencia), hasta $\Delta x'=10\Delta x$. Para cada $\Delta x'$ se almacenaron 5 datos. La figura 35 muestra la señal digitalizada del emisor y receptor para una posición a $x=10$ cm y $\Delta x=100$ micras.

Figura 35. Señales correspondientes a una distancia de separación $x=10$ cm y $dx=100$ micras para a) señal del emisor b) señal del receptor.



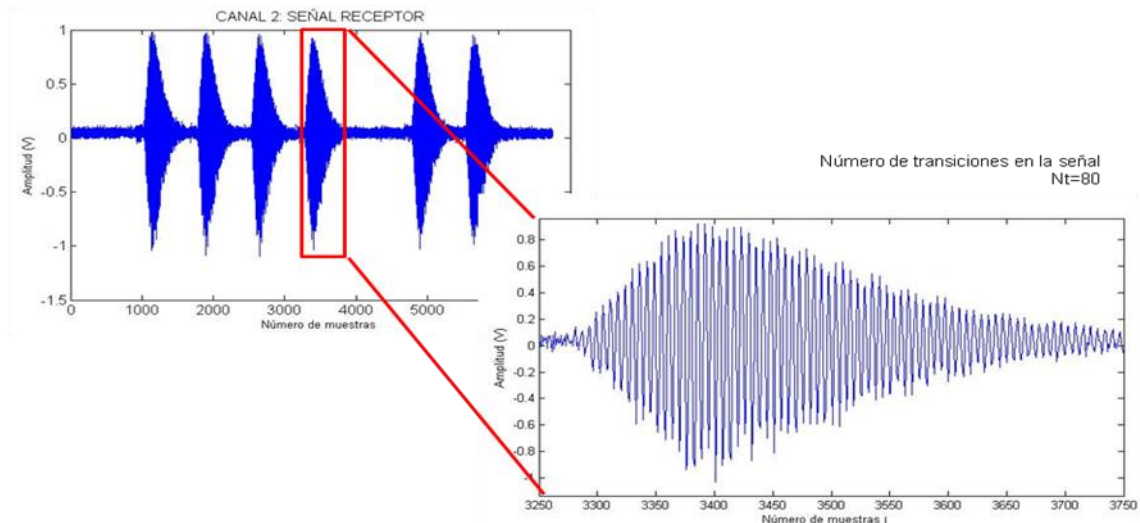
Para cada una de las señales obtenidas se le calcula la transformada de Fourier y se multiplica por la función de transferencia del filtro obtenido anteriormente. La envolvente y la fase discontinua se calculan usando las ecuaciones (3.9) y (3.10). La Figura 36 muestra las envolventes calculadas para las señales mostradas en la Figura 35.

Figura 36. a) Señal del emisor b) Envolvente normalizada de la señal del emisor c) Señal del receptor d) Envolvente normalizada de la señal del receptor.



La envolvente normalizada es binarizada usando un umbral de 0.5: valores de uno en la señal binaria corresponde a puntos dentro de un bit. Se identifican las transiciones de 0 a 1 o viceversa para identificar los bits que posee la señal. Para identificar la posición central de cada bit 1 se procede de la siguiente manera: la envolvente del bit se aísla y se normaliza. Se busca un umbral de tal manera que la región en 1 posea una determinada cantidad de transiciones $\pm\pi$ en la fase discontinua. Así para la señal del emisor se emplearan 14 transiciones $\pm\pi$ ya que corresponden a 15 máximos del tren de pulsos. Para la señal del receptor en número de transiciones dentro de toda la envolvente era cercana a 80 trenes sinusoidales (ver Figura 37), se fijaron 20 transiciones $\pm\pi$ que corresponden a 21 máximos sinusoidales. El proceso de buscar el umbral era automático, se partió de un umbral inicial arbitrario de 0.7 y se aumenta gradualmente hasta encontrar el número deseado de transiciones.

Figura 37. Transiciones al interior de la envolvente de la señal recibida.



Las figuras 38 y 39 muestran las 14 y 20 transiciones encontradas para un bit de las señales del emisor y receptor respectivamente. Una vez, identificado el valor del umbral apropiado, se extrae de la señal de fase discontinua los valores de fase ubicados entre las discontinuidades N_1 y N_2 . Así, para la señal del emisor se

empleó $N_1= 7$ y $N_2= 8$ y para la señal del receptor $N_1= 10$ y $N_2= 11$. De esta manera entre N_1 y N_2 se encuentra el valor de fase igual a cero que corresponde al centro del pulso ubicado en el centro del tren de pulsos. Como hay 6 puntos de muestreo en un periodo de la señal, la posición T_0 donde la fase tiene valor de cero es interpolada de la señal. De esta manera cada bit en 1 que posee la señal tiene un valor de T_0 interpolada que identifica su centro. La rutina generada en MATLAB ubica los valores de T_0 en un vector POSCT1 y POSCT2 para los centros de los bits en uno de la señal del emisor y del receptor respectivamente.

Figura 38. Fase discontinua de 14 transiciones correspondiente a la señal del emisor para un bit de la señal.

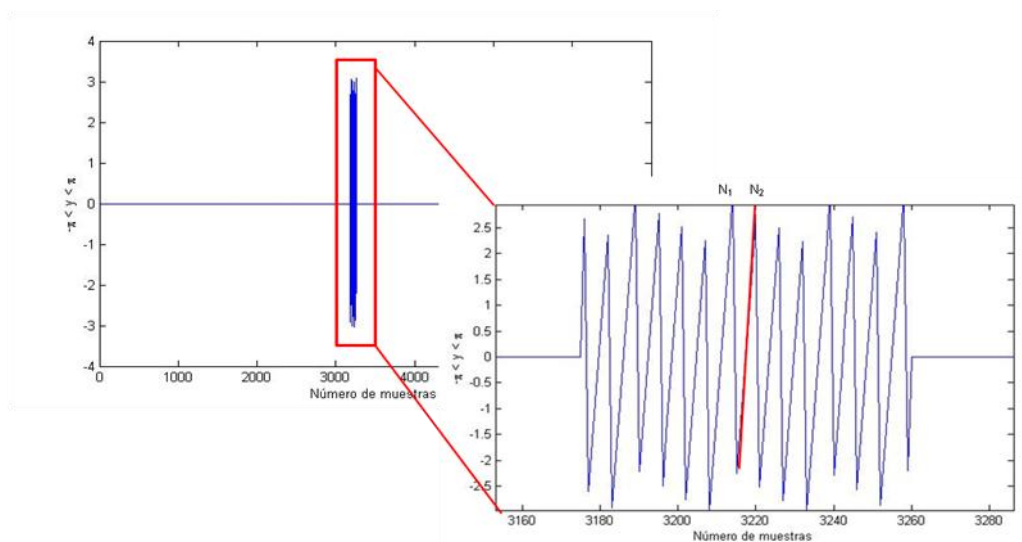
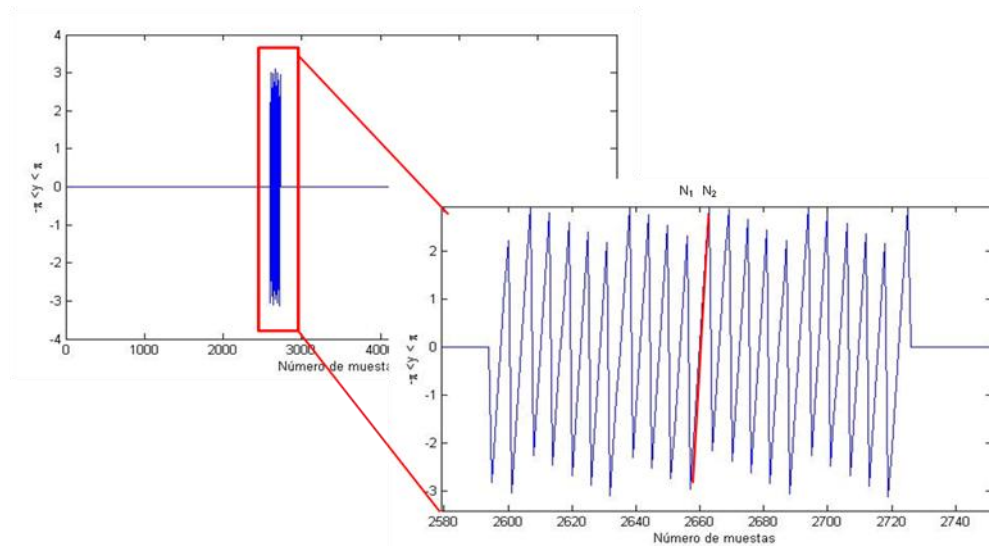


Figura 39. Fase discontinua de 20 transiciones correspondiente a la señal del receptor para un bit de la señal.



La diferencia entre

$$P_{2-1} = POSCT2 - POSCT1. \quad (3.12)$$

Determina el retardo temporal entre el emisor y el receptor. Así, para una posición $x+\Delta x$ entre emisor y receptor se calcula P_{2-1} medio y su desviación estándar. Como para una posición $x+\Delta x$ se tomaron 5 valores y como Δx se incremento 10 veces, se obtienen 2 matrices de 11 filas con 5 columnas que almacenan el valor medio y la desviación estándar. De igual forma los valores de Δx fueron 4 (100, 200, 500 y 1000 μm), se obtienen 8 matrices. Estas 8 matrices agrupan la información para un x . en total x se alteró a valores de 4, 7, 10, 15 y 20 cm, o sea, hay 40 matrices en total. La Figura 40 muestra los valores de las matrices para $x=10$ cm para diferentes Δx . En la Figura 41 se muestra la posición central para las señales del emisor y el receptor.

Figura 40. Matrices de valores medios y desviaciones estándar para $x=10$ cm a) $\Delta x=100$, b) $\Delta x= 200$, c) $\Delta x=500$ y d) $\Delta x=1000$ micras.

```

a) >> M_Medios
M_Medios =
1.0e-003 *
0.773679546864240 0.773973734997067 0.774094978270371 0.774075058811921 0.773746787626780
0.774270191771096 0.774161175023342 0.779135089272083 0.779258091566746 0.774386763628695
0.774580335259113 0.774600744584806 0.786967220875433 0.780606669435688 0.774592018935364
0.774801896130446 0.774942458500859 0.774756980295108 0.783103744441956 0.774861776723618
0.774989539683384 0.774932221086968 0.783312488450164 0.783207750493059 0.779058930569960
0.778960035230590 0.775377002821503 0.780401715531207 0.775340288259686 0.775277011003638
0.775744077862430 0.783930147577091 0.783893127188107 0.779761722113761 0.775547544757653
0.775901064181203 0.780139625100785 0.775887684146199 0.779899559130397 0.775806316286014
0.776182322070960 0.788681967562350 0.776295012035502 0.776334982037558 0.781000640527926
0.784902262877468 0.776469363048297 0.776372819766293 0.776667937394033 0.776581869175347
0.776745135607283 0.776877471756312 0.776925637609387 0.776727906061737 0.776826666793680

>> M_STD
M_STD =
1.0e-004 *
0.001314231230681 0.001324620074218 0.000837146855651 0.001116793567149 0.000616644706024
0.001722687916740 0.001571120226245 0.111710326959927 0.110038252035803 0.002085879827245
0.000847486026225 0.000190322356117 0.143604174119100 0.124211150729494 0.002138774321307
0.000778695838573 0.001099336476671 0.001666667210897 0.142554368585194 0.001091257274772
0.002501652714004 0.000980532657744 0.143868412030887 0.143409787305311 0.101794840069047
0.092878660383857 0.000861505867057 0.110281341864204 0.001043472215887 0.000748425360833
0.000284048060263 0.1427399478856776 0.143314280306560 0.101476080147186 0.000855948178452
0.000572838809956 0.101243567544172 0.001039974314971 0.101230641173670 0.000650660585855
0.000696582498260 0.173374993801855 0.001451161452634 0.000663996396047 0.109704361160064
0.143198735405835 0.000707177133591 0.001892164686587 0.002019837876548 0.002052648625835
0.000244666918075 0.000846728489408 0.002070282637246 0.000936812894504 0.000418678462955

```

```

b) >> M_Medios
M_Medios =
1.0e-003 *
0.778225350364519 0.780087347186076 0.773760665727920 0.773939975246565 0.773875240388390
0.786818390642516 0.780596955309897 0.774692527701846 0.777946089632957 0.774473549205078
0.775035122105082 0.775165900537473 0.775072979710099 0.775044117553004 0.774975968364350
0.779681516412820 0.775536629810477 0.775592821496555 0.783981098956212 0.775472688166770
0.776267516198382 0.7762476548660293 0.776247682522506 0.776199605499773 0.776004594766818
0.789081504797671 0.780878190850954 0.786719537537973 0.776984191930075 0.785067199122868
0.777337506948308 0.777416442655656 0.78360986603000 0.782326043892056 0.777269334090204
0.777921562192948 0.777979087210719 0.777878798979522 0.784227958340302 0.777858731563965
0.778637416008518 0.778675270690284 0.778314953236808 0.778568091088886 0.778465664565623
0.779167826214146 0.785070238504960 0.779126143205447 0.778973711696046 0.779070990581959
0.779388789503239 0.784454602741906 0.779682158658509 0.779635495165188 0.779587881737133

>> M_STD
M_STD =
1.0e-004 *
0.099670700584766 0.124337692382641 0.000832298494073 0.000572319053000 0.000443758236961
0.142916048190121 0.124180160520520 0.000999351579398 0.093727086068184 0.000444090836331
0.000928963297364 0.000383691791923 0.000691323841346 0.001337802808662 0.000810296901610
0.100878213630362 0.002103709392489 0.002238763447187 0.144117028222453 0.000693398740159
0.000998402757916 0.001789767830116 0.000778785235638 0.001236143247329 0.000674734056246
0.144011871647664 0.101016323474501 0.136098734792338 0.001947218599371 0.143377045759225
0.001073175774878 0.001472238959574 0.124850145416758 0.112125034157087 0.001559157140597
0.001358143952107 0.001678109345402 0.000713934681840 0.123466799883444 0.001748953474381
0 0.000358255293704 0.001221689046315 0.000424831461754 0.001576285058349
0.000762828290536 0.123394549298456 0.001018541534597 0.000936825392584 0.001373312850042
0.000796360933970 0.111088922392392 0.002237130132708 0.001395678506019 0.001409794366926

```

```

c) >> M_Medios
M_Medios =
1.0e-003 *

0.773756540398858 0.774028712014094 0.773765046538629 0.773630434127529 0.773710459969905
0.775143377405131 0.775216081752708 0.775227231664052 0.775282650504590 0.775038745399258
0.776764051953740 0.776836284692965 0.781694091757518 0.776909805053529 0.776737017824573
0.778150190490181 0.778228929824476 0.778195656757191 0.778251380937684 0.778209562837557
0.779437415346751 0.785545360824017 0.779280793135891 0.779371913195403 0.779103352345083
0.781011702196919 0.780988521647038 0.789152443108840 0.781068346676189 0.781108812846947
0.782470481831992 0.782344111156123 0.782586195501003 0.788654261894747 0.782493522987280
0.783902090784392 0.796248241576751 0.783912105247040 0.784069010406278 0.783802223116927
0.785283999036496 0.793674344182020 0.785213101032478 0.785237099458498 0.784940001527954
0.786602356508168 0.786813461639163 0.791933806882996 0.786835679162828 0.786913084672047
0.788184419419372 0.788271781062732 0.788238134487810 0.788356644330731 0.788446850841818

>> M_STD
M_STD =
1.0e-004 *

0.001063761139798 0.000562645210687 0.000373881273851 0.001179469778931 0.000954027196544
0.000887545807798 0.001000777128023 0.001465548881024 0.002616257040086 0.00113558632508
0.001239159702254 0.000043859272466 0.110271858528988 0.000167253896618 0.001174318705401
0.000539770630117 0.000859572177692 0.001817220500418 0.001100486348344 0.001727492953134
0.000572428475805 0.122565442774263 0.001952932680829 0.003065308674261 0.001700487438710
0.001244590928799 0.001848602331953 0.145243620647187 0.001672206849216 0.001420677889542
0.000863802943491 0.001845241896337 0.000578061888925 0.125821881078614 0.001057109071941
0.000840582606597 0.142567514535994 0.000821716575310 0.000767625199965 0.001191087990006
0.001564304108692 0.143549441518346 0.000719264339136 0.001562369339784 0.000394796368896
0.001666281752475 0.001286559317112 0.110101694732693 0.001558896945843 0.000621616133764
0.000302414858604 0.0007948861059540 0.000983116137422 0.000513632518832 0.001950248932365

```

```

d) >> M_Medios
M_Medios =
1.0e-003 *

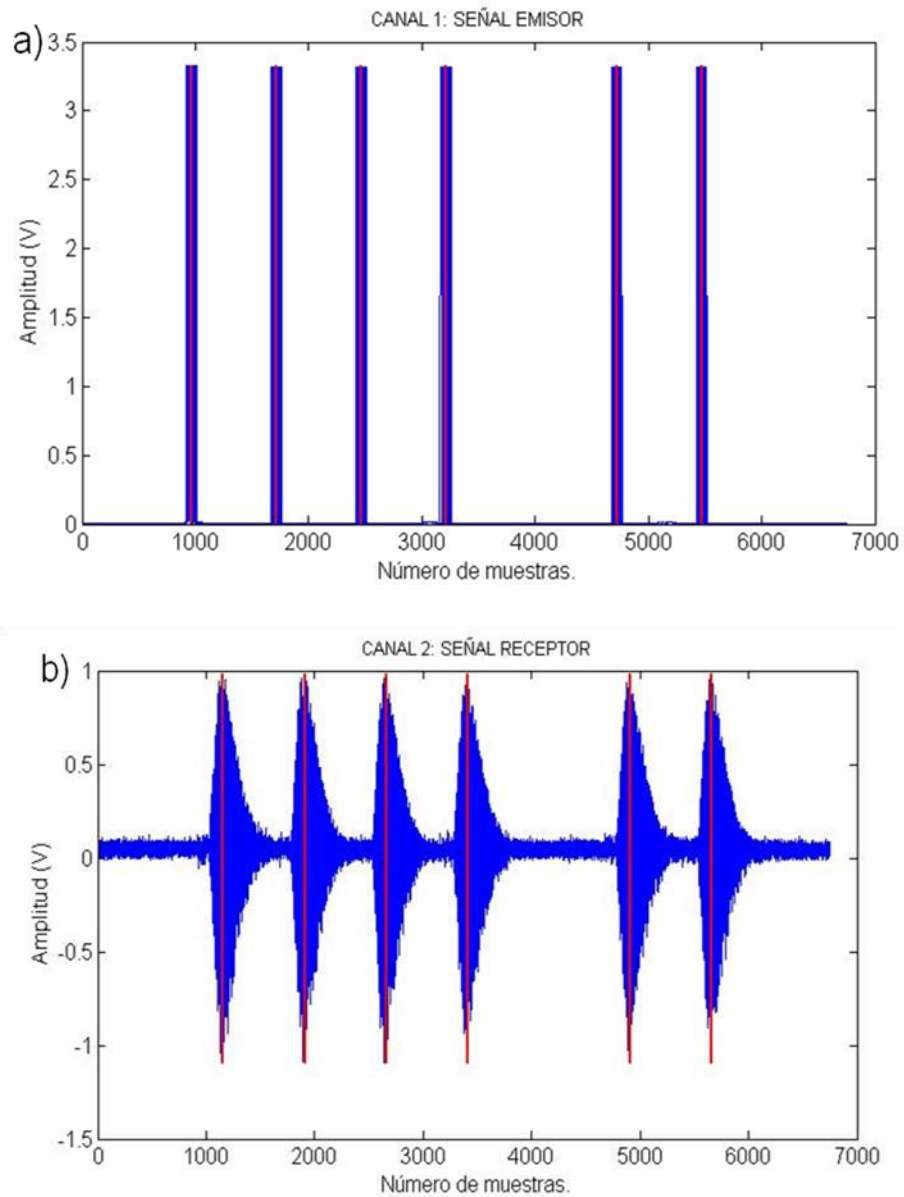
0.786184638507062 0.773708957867463 0.774037018344832 0.778696211289204 0.773958470395039
0.776727181933200 0.776558231386738 0.776907056055117 0.782930196079635 0.776768554835188
0.779516926750661 0.779418464448143 0.779562190199999 0.779562390101724 0.779427842054863
0.788524926350506 0.782620925021902 0.782645420266531 0.782315957526595 0.782669991673824
0.785190925918199 0.785339515100391 0.785402950310919 0.785623942087252 0.785336397590036
0.788269941315612 0.788227803926078 0.788105856922730 0.788245785785576 0.788463003483709
0.790988316010365 0.791077387850211 0.791319753385210 0.791043036169402 0.791208234244307
0.794047492230212 0.794132922766798 0.794146896807332 0.793948281310016 0.793929474653937
0.796933377069004 0.797104985662604 0.796906439980286 0.796839125797859 0.796776461823227
0.799808196154274 0.800013742646854 0.799954981951011 0.799895552424433 0.799716632790554
0.802707727846894 0.802719250413894 0.802645419923194 0.802742021180993 0.802611381807658

>> M_STD
M_STD =
1.0e-004 *

0.143457522074592 0.000597007034980 0.001071297449332 0.111106148272804 0.001245173006306
0.001055193876835 0.001504743092399 0.001084123885114 0.123241939607806 0.001291821508697
0.001272646972947 0.001796488050741 0.000919590793820 0.000274269714574 0.001882136714463
0.123476637454500 0.001626207211403 0.001078745391280 0.002331712886277 0.001084582813800
0.002231848474316 0.001781275134920 0.001087300866117 0.001633812838773 0.000694496594385
0.001149340043866 0.000838958157154 0.000719052233682 0.000710550110040 0.000837965442970
0.001831493940577 0.000582342503075 0.001729954703991 0.000728646322325 0.000805834544346
0.001834753160435 0.001417923530532 0.002335089784961 0.000885768715529 0.001343023998187
0.001226399330061 0.000423614031333 0.000661562561382 0.000633987261645 0.000559166305737
0.000577862547433 0.000663562050683 0.000552842665036 0.001384182823742 0.001527332075397
0.000919763211447 0.000889691232043 0.000584325211905 0.001381485638385 0.001691748672043

```

Figura 41. Posición central a) señal del emisor b) señal del receptor



4.4 RESULTADOS

Utilizando la información almacenada en cada matriz de valores medios y de desviaciones estándar se evalúa cómo es el comportamiento para medir los

distintos desplazamientos Δx a diferentes distancias de separación emisor – receptor x . Es decir, se pretende verificar cual es el error que se comete al medir Δx con el esquema propuesto. Para esto, se calculan los promedios por fila de los datos de posición en la matriz de valores medios, cuya desviación estándar es baja obteniendo un vector columna de 11 elementos. La primera fila corresponde al valor promedio en tiempo para la posición de referencia (para el ejemplo mostrado $x=10$ cm) y el resto de las filas corresponden al valor promedio en tiempo para cada uno de los desplazamientos con paso Δx . Sobre esos promedios se calculan los desplazamientos Δx , realizando una operación entre el dato en la posición del vector $Posc(j+1)$ y la posición del vector $Posc(j)$, donde $j= 2, 3, \dots, 11$ filas del vector y al resultado obtenido se le multiplica el valor de la velocidad de las ondas acústica $v=345$ m/s, para calcular el valor de los desplazamientos Δx , según la expresión

$$v = \frac{x}{t} \Rightarrow x = v \cdot t \quad (3.13)$$

Donde t está dado por:

$$t = Posc(j+1) - Posc(j) [s]. \quad (3.14)$$

Esta operación es realizada con el fin de eliminar los retardos en tiempo producidos por los transductores emisor y receptor, así como la diferencia temporal para cada distancia de separación x y se obtenga únicamente la separación temporal para cada desplazamiento Δx . Este tiempo es el resultado de la sustracción entre los vecinos. El cálculo de los desplazamientos finalmente viene establecido por

$$\Delta x[m] = (Posc(j+1) - Posc(j)) \times 345 [m/s]. \quad (3.15)$$

Estos desplazamientos Δx calculados corresponden a los desplazamientos experimentales.

El cálculo del error en la medición se obtiene a partir de la expresión

$$error = \Delta x_{teórico} - \Delta x_{experimental} \quad (3.16)$$

Sabiendo que Δx teórico se conoce. Inicialmente se desea evaluar el error que se comete al medir un Δx sin importar el valor de x . la Figura 42 muestra la nube de puntos obtenidos para 100, 200, 500 y 1000 μm a diferentes x . Para todos los Δx hay un error máximo de $\pm 100 \mu\text{m}$ aproximadamente. La Figura 43 muestra el error obtenido al usar la ecuación (3.16), donde el Δx experimental corresponde a valor medio de cada nube a un Δx dado. La figura indica que el error medio es constante e inferior a $10 \mu\text{m}$ que corresponde al error del valor teórico. De las dos figuras se concluye que la dispersión de la nube no se deforma con Δx y el valor central tiene un error inferior a $10 \mu\text{m}$ tanto para medir $\Delta x = 100 \mu\text{m}$ como para $\Delta x = 1000 \mu\text{m}$.

Figura 42. Desplazamientos teóricos Δx vs desplazamientos experimentales Δx .

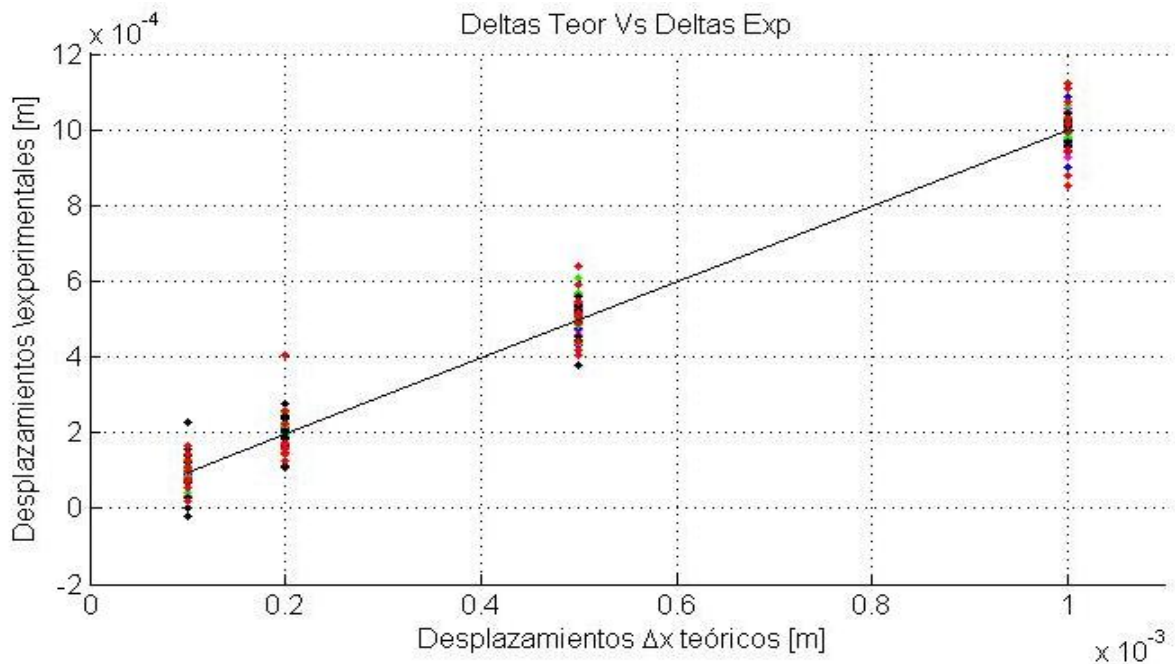


Figura 43. Desplazamientos teóricos Δx vs error.

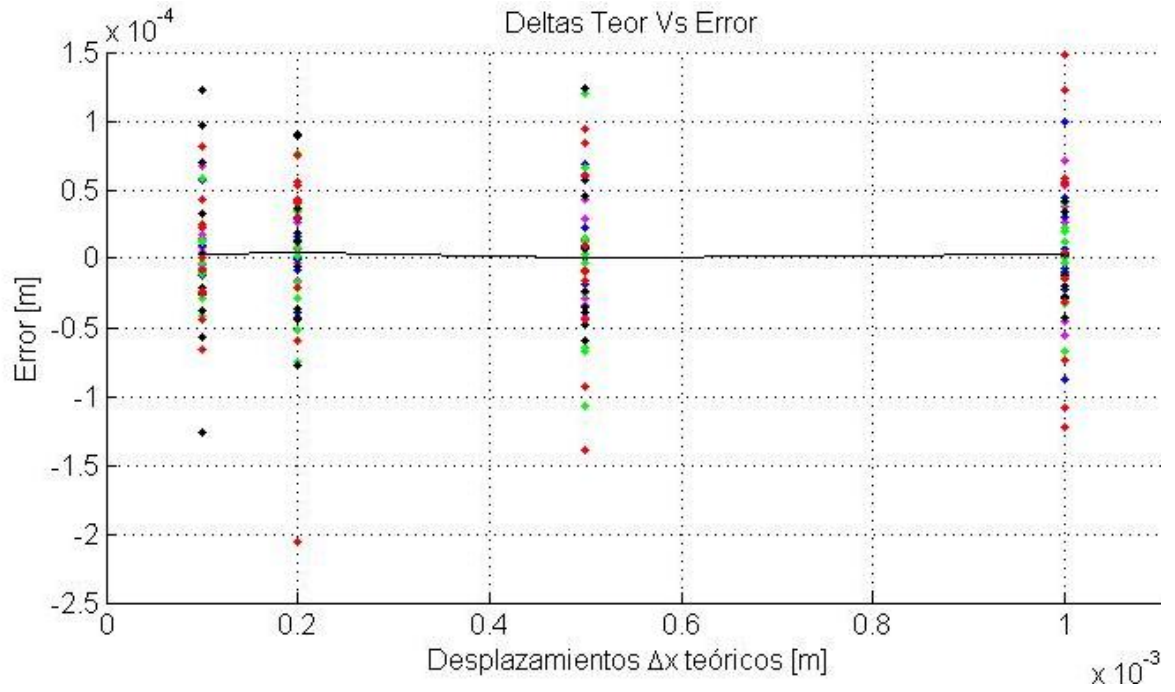
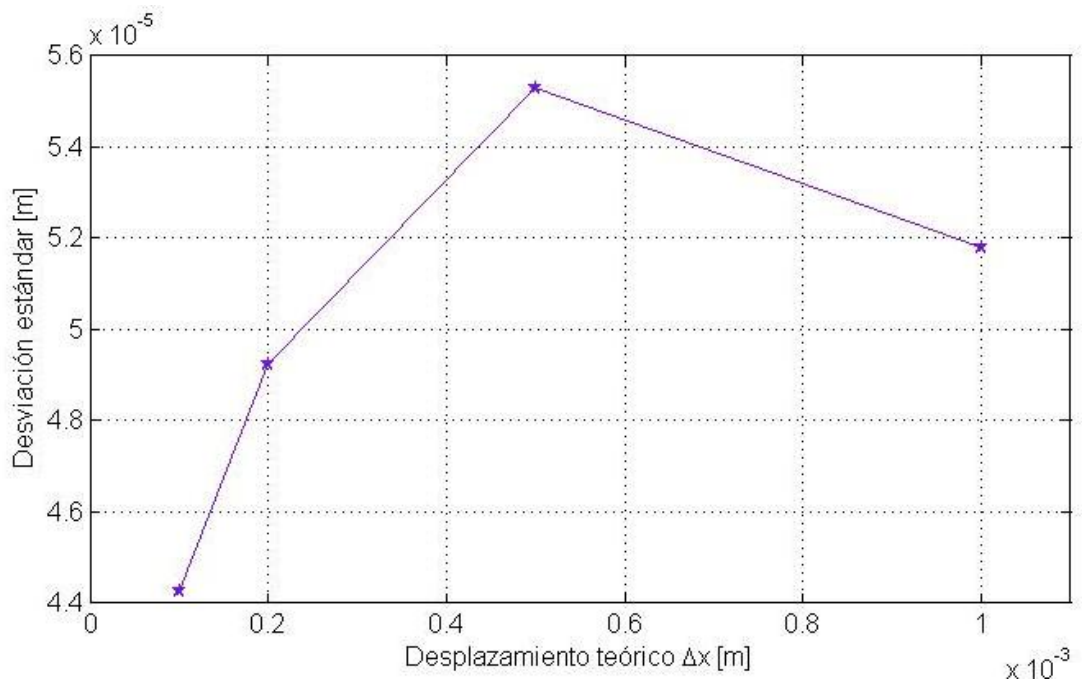


Figura 44. Desplazamientos Teóricos Δx vs desviación estándar.



La desviación estándar puede ser interpretada como una medida de incertidumbre. La desviación estándar de un grupo repetido de medidas nos da la precisión en la medición. Para medir 100 micras se observa que hay una desviación estándar de 44 μm . El valor más alto en la desviación estándar se presentó para los datos de desplazamiento $\Delta x=500\mu\text{m}$, este valor es de 56 μm .

La diferencia del cálculo de la desviación estándar de los valores mostrados en la figura 44 con respecto a los valores encontrados en las figuras 43 y 42 debe a que en la figura 46 se está pintando el valor promedio de las desviaciones estándar de todos los datos para cada distancia de separación x entre transductores, mientras que en las figuras 43 y 42 los valores que aparecen allí tienen en cuenta sus valores de desviación estándar correspondientes.

En las Figuras 45, 46, 47 y 48 se observa cómo se comporta la medición de los desplazamientos Δx para cada distancia x . Las figuras indican cual es el error que se comete al medir los desplazamientos Δx en función de x . Estas figuras corresponden a las distancias de separación entre los transductores x contra el error en la medida para los diferentes valores del desplazamiento $\Delta x= 100, 200, 500$ y $1000 \mu\text{m}$.

Figura 45. Distancias de separación x vs error para un desplazamiento $\Delta x=100 \mu\text{m}$.

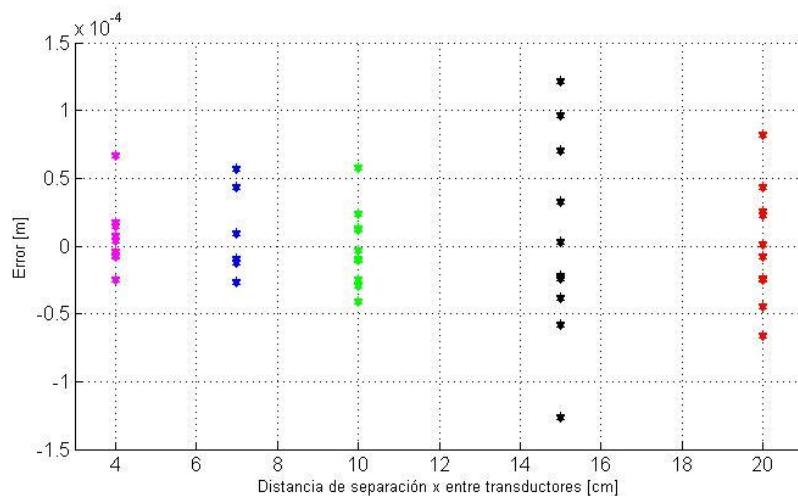


Figura 46. Distancias de separación x vs error para un desplazamiento $\Delta x=200$ μm .

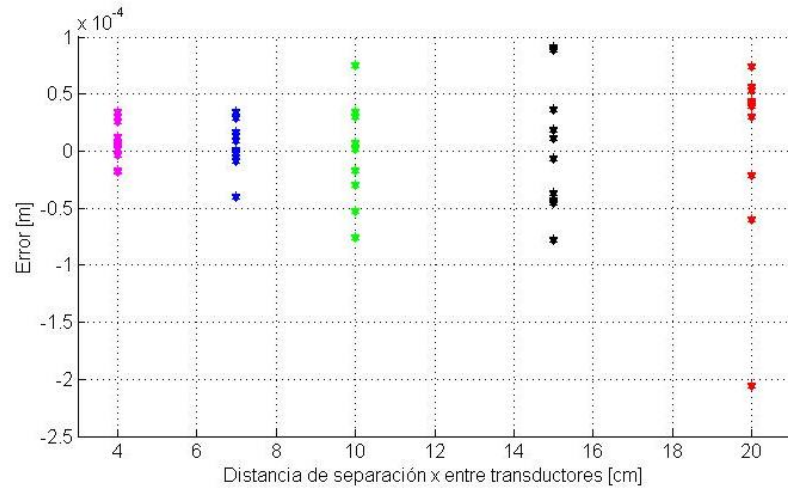


Figura 47. Distancias de separación x vs error para un desplazamiento $\Delta x=500$ μm .

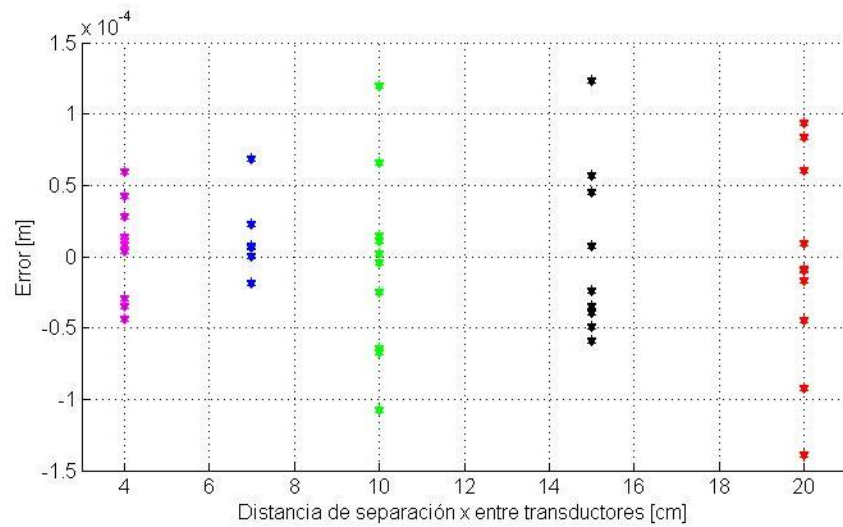
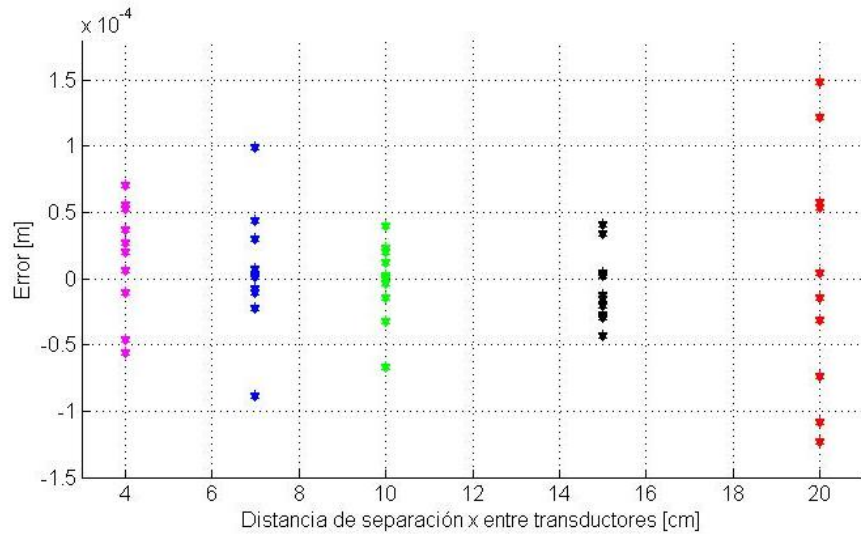
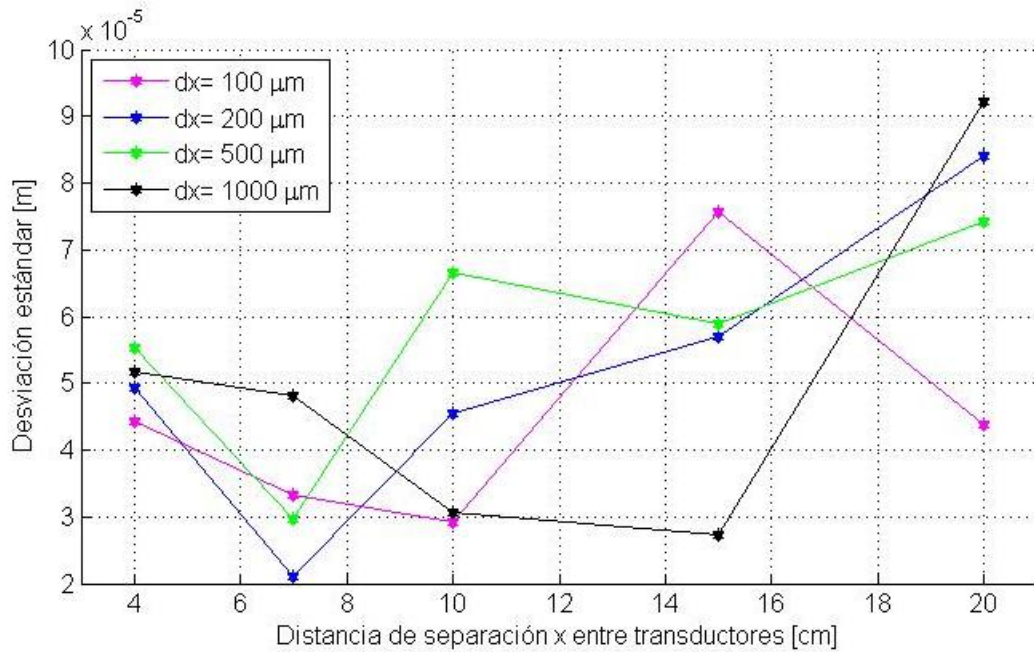


Figura 48. Distancias de separación x vs error para un desplazamiento $\Delta x=1000$ μm .



Observando las figuras 45, 45, 47 y 48 se llega a la conclusión que independientemente de Δx , el error que se comete se acota entre $\pm 100 \mu\text{m}$ aproximadamente, independiente del valor de x .

Figura 49. Distancias de separación x vs Desviación estándar.



Para el caso de la figura 49, se están graficando las líneas de desviación estándar para todas las distancias de separación entre los transductores x . Cada línea corresponde a los valores de desviación estándar para los desplazamientos $\Delta x=100, 200, 500$ y $1000 \mu\text{m}$. Los puntos resaltados sobre cada línea corresponden al valor promedio de las desviaciones estándar de todos los datos para cada distancia de separación x .

De manera general, el análisis de error concluye que medir $\Delta x= 100, 200, 500$ y $1000 \mu\text{m}$ es independiente de x para el rango de 4 a 20 cm. Aunque el valor medio de la Figura 43 indica que el error no supera las $10 \mu\text{m}$, para $\Delta x= 100, 200, 500$ y $1000 \mu\text{m}$ con una desviación estándar que no supera los $56 \mu\text{m}$, si se obtiene un rango de valores de error que se ubica entre $\pm 100 \mu\text{m}$ aproximadamente e independiente del valor de Δx . Es decir, basados en el rango de valores del error, al hacer una medida de Δx se comete un error de $\pm 100 \mu\text{m}$, lo cual implica que medir $200 \mu\text{m}$ es la resolución aproximada del sistema propuesto. Sin embargo, haciendo no una medida, sino el promedio de 50 mediciones de Δx se obtiene un error que no supera las $56 \mu\text{m}$. Es decir, una medida corresponde a un tiempo de adquisición de 27 ms y se promedia en función del número de bits en 1 encontrados. Así, 50 mediciones corresponden a una ventana de adquisición de 1.35 segundos.

5 CONCLUSIONES

Con el desarrollo del presente trabajo se evaluó una propuesta para medir distancias con ultrasonido buscando superar la resolución de los sensores comerciales. Del trabajo realizado se concluye:

1. Se diseñó y construyó el dispositivo electrónico GEN_CODE para generar las señales temporales codificadas en amplitud, utilizando la modulación M-Secuencia.
2. El sistema de adquisición empleado fue la tarjeta de adquisición NI-PCI6251, programada por LABVIEW a una frecuencia de muestreo de 250000 Hz y una ventana de adquisición de 27 ms.
3. Se desarrolló un procedimiento experimental para evaluar el error que se comete al medir una variación en la distancia de separación entre emisor y receptor. Se emplearon distancias de 4, 7, 10, 15 y 20 cm y se introdujeron variaciones de 100, 200, 500 y 1000 micras. Para una posición dada se introdujeron 10 variaciones sucesivas y para cada posición se tomaron 5 registros. De esta manera, un valor de variación en la distancia posee una población de 50 medidas. De los datos experimentales se concluye que al hacer una medida de variación de distancia en una ventana de adquisición de 27 ms se obtiene un rango de error de ± 100 micras. Pero si se emplea el promedio de las 50 mediciones para una variación de distancia se obtiene un error medio en la medida de 10.6 micras con una desviación estándar de 56 micras.
4. El análisis de datos demuestra que para el intervalo de 4 a 20 cm en la distancia, el rango de error al hacer una medida en la variación de la

distancia es independiente del valor de la variación de la distancia y de la distancia entre emisor y receptor.

6 PERSPECTIVAS DE TRABAJO FUTURO.

Se recomienda hacer un estudio detallado de las características y la geometría de la señal recibida, haciendo énfasis en recuperar por medio de este estudio y posterior tratamiento, la forma y características de la señal emitida con el corrimiento temporal generado por la distancia de separación de los transductores.

Para distancias superiores a 60 cm se recomienda hacer un tratamiento en la señal para eliminar la influencia del ruido, debido a que a distancias superiores la amplitud de la señal disminuye y la influencia del ruido es mayor.

La técnica desarrollada en este trabajo será implementada en sistemas manuales de reconstrucción tridimensional que se diseñarán y construirán en trabajos futuros. De esta manera, se empleará una señal temporal de ultrasonido como elemento codificador para calcular las coordenadas 3D globales de un sensor 3D.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] AMBARDAR, A., Procesamiento de señales analógicas y digitales. Michigan technological University. Thomson Learning, segunda Edición. Traducción México. 2002, 814 p.
- [2] AUDENAERT, K., PEREMANS, H., KAWAHARA, Y., VAN CAMPENHOUT, J., Accurate Ranging of multiple objects using ultrasonic sensor. International conference on Robotics and Automation. Belgium .1992, 6p
- [3] BERKOVIC, G; SHAFIR, E. Optical Methods for distance and displacement measurements. Optical Sensing Group Applied Physics Division. Advances in Optics and Photonics. Optical Society of America. 2012, 31 p
- [4] BJOR, O.H., Maximum Length Sequence. Norsonic AS. 1995-2000, 8p.
- [5] CARLIN, B. Ultrasonics. Editorial McGraw-Hill Book Company. 1960. 309 p.
- [6] CONTROL MEASUREMENT SYSTEM CMS METROLOGY. Estados Unidos. Ultima visita enero 26 de 2013. Disponible en internet: <http://www.cmsmetrology.com.mx/equipos/dimensional/medidores-por-ultrasonido/#>
- [7] FRENCH, A.P. Vibraciones y Ondas. Editorial Reverté S.A. 1974, 356 p.
- [8] IZARRABAL, J.M. Medición de distancias implementando ultrasonido. Tesis de pregrado ingeniería electrónica. Argentina. Universidad Nacional de Misiones. Facultad de Ingeniería. 2004, 40 p.
- [9] KAMEN, E., HECK, B. fundamentos de señales y sistemas usando la web y Matlab. Editorial Pearson Prentice Hall. 2008, 658 p.

[10] MARTINEZ, J. Conceptos generales de la emisión de ondas ultrasónicas para el control de materiales. INACAP Valdivia. Capitulo 1. 15 p. Documento disponible en <http://es.scribd.com/doc/105628746/conceptos-basicos-ultrasonido>. Ultima visita enero 10 de 2013.

[11] MURAKAMI Y., KHURI-YAKUB B.T., KINO G.S, RICHARDSON J.M, EVANS A.G., The applications of adaptative filtering to defect characterization. First Int. Symposium on Ultrasonic Materials Characterization, Gaithersburg, MD, USA. 1978, 6 p.

[12] NISHIHARA, K., YAMAGUCHI, T., HACHIYA H., Position detection of small objects in indoor environments using coded acoustic signal. The Acoustical Society of Japan. 2007, 6 p

[13] PEREZ, Z., ROMERO, L.A., Sistema óptico de reconstrucción tridimensional para la detección de ampollas en recubrimientos. Trabajo de grado Físico. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2004, 97 p.

[14] RUSER, H., VOSSIEK, A., JENNA, V., MÁGORY, V. Inverse filter technique for high-precision ultrasonic pulsed wave range Doppler sensor. Corporate Research and Development, Siemens AG. IEEE, München, Germany. 1997, 4 p.

[15] TAKEDA, M., INA, H., KOBAYASHI, S., Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. J. Opt. Soc. Am. Volumen 72. 1982, 5 p.

[16] ZAMUDIO, J., Medidor de distancia ultrasónico. A.G Electrónica S.A de C.V. División de Ingeniería. México. 2008, 7 p. Ultima visita enero 26 de 2013. Documento disponible en <http://www.agspecinfo.com/pdfs/M/MEDIDX1.PDF>.