



Umbral Científico

ISSN: 1692-3375

umbralcientifico@umb.edu.co

Universidad Manuela Beltrán

Colombia

Villarreal, E.; Celedón, E. A.; Buendía, C. A.; García, L.A.
MEDIDOR DE ESPORES PARA MATERIALES METÁLICOS USANDO ULTRASONIDO
Umbral Científico, núm. 14, junio, 2009, pp. 130-142
Universidad Manuela Beltrán
Bogotá, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30415059012>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

MEDIDOR DE ESPESORES PARA MATERIALES METÁLICOS USANDO ULTRASONIDO

E. Villarreal*, E. A. Celedón**, C. A. Buendía*** y L.A.García ****

Fecha de recepción: Noviembre 19 de 2008

Fecha de Aceptación: Abril 24 de 2009

RESUMEN: El presente trabajo presenta el desarrollo de un equipo para diferenciar espesores en materiales metálicos, mediante el uso de un transductor ultrasónico capaz, tanto de generar un pulso ultrasónico al interior del material como de recibirlo de vuelta una vez este rebota contra la cara opuesta de la pieza. Se propone una nueva estrategia para medir el desfase entre la señal emitida y recibida mediante un convertidor de desfase a voltaje, mucho menos sensible al ruido que la tradicional medida del tiempo de vuelo mediante la detección del cruce por cero. Se presenta el diseño detallado de un equipo para la medida de espesores con el método propuesto y luego se plantea un diseño experimental que permite evaluar su exactitud, precisión y determinar su rango de operación. El prototipo desarrollado es capaz de diferenciar los espesores de una probeta de prueba con distintos escalones de 5mm de diferencia entre sí.

PALABRAS CLAVES: convertidor desfase voltaje, medición de espesores, ultrasonido, método pulso-eco.

ABSTRACT: This article presents the development of a device for measuring the thickness of metallic pieces using an ultrasonic transducer that generates the ultrasonic pulse into the material and detects it back when it bounces against the opposite side of the piece. A new approach is proposed in order to measure the lag between the emitted and the received signals using a lag to voltage converter less sensitive to noise than the traditional time of flight measure through the zero crossing detection. The detailed design of the equipment is presented and then, an experiment design is proposed in order to evaluate its accuracy, precision and its operation range. The developed prototype is capable of differentiate the thickness of a test probe with ladders of 5mm of difference between them.

KEYWORDS: lag to voltage converter, thickness measurement, ultrasound, pulse-echo method.

1. INTRODUCCIÓN

La medición de espesores es una tarea indispensable en la supervisión y el mantenimiento de una gran cantidad de sistemas de distribución de líquidos y gases, principalmente en aquellos con características corrosivas que pueden llegar a afectar la estructura y composición de la tubería contenedora.

En la mayoría de los casos resulta demasiado costoso desmontar algún tramo o componente de la tubería para su revisión, tanto por la labor de montaje y desmontaje en si, como por la necesidad de detener el flujo durante esta etapa. Por esta razón se han propuesto distintas alternativas para

* M. Sc en Automatización Industrial, Docente investigador GIAT/UMB

** Facultad de Ingeniería Electrónica, Universidad Manuela Beltrán, Bogotá, Colombia

*** Facultad de Ingeniería Electrónica, Universidad Manuela Beltrán, Bogotá, Colombia

**** M. Sc en Ingeniería Electrónica, Docente investigador GIAT/UMB

e-mail: edwin.villarreal@umb.edu.co

realizar dicha revisión, sin necesidad de alterar la composición ni el estado de la pieza a medir. Estas propuestas se conocen como *ensayos no destructivos* o NDT por sus siglas en inglés, Non Destructive Test. Son frecuentemente usadas en aplicaciones tales como la detección de discontinuidades y de corrosión, determinación de características físicas y control de calidad de materiales.

La medición de espesores mediante el empleo de ondas ultrasónicas es un método alternativo que ha tenido una gran acogida en esta labor, dado que permite obtener medidas suficientemente precisas sin causar ningún daño a la estructura analizada.

Aunque en la actualidad existen una gran variedad de desarrollos comerciales para esta aplicación, estos dispositivos aun resultan demasiado costosos en el mercado nacional, hecho que ha limitado su aplicación, a pesar de la alta demanda y el atractivo que representa el poder realizar la supervisión de una pieza o estructura sin necesidad de desmontar ningún componente, evitando daños y costos adicionales.

Este trabajo presenta los aspectos básicos relacionados con el diseño e implementación de un dispositivo portátil y de bajo costo que, por medio de la utilización de ondas ultrasónicas, realice la medida del espesor de una pieza de aluminio.

Inicialmente se presentan algunos conceptos teóricos relacionados con la medición de espesores y se presentan algunos antecedentes significativos. Posteriormente se entra en detalle en el diseño de cada uno de los módulos que componen el equipo. Seguidamente se detalla el diseño experimental propuesto para poner a prueba el desempeño del equipo y finalmente se muestran algunos resultados significativos de los experimentos realizados.

2. MATERIALES Y METODOS

A continuación se presentan algunos de los conceptos teóricos fundamentales para el desarrollo del proyecto, junto con algunos de los antecedentes teóricos más significativos en el campo de la medición de espesores mediante el uso de ondas ultrasónicas.

Posteriormente se presentan los bloques principales del sistema propuesto para desarrollar cada uno por separado. Finalmente se presenta la integración de todos ellos dentro de un único equipo.

2.1 Contextualización

El ultrasonido es una vibración mecánica que no puede ser captada por el oído humano. Es transmitido a través de un medio físico y su unidad de medida es el Hertz (Hz). Tiene la capacidad de propagarse en todos los materiales, mediante el movimiento armónico de sus moléculas. Debido a esto el ultrasonido es usado en múltiples aplicaciones ya sea para medios sólidos, líquidos o gaseosos. [1][2]

En la actualidad, el ultrasonido está siendo utilizado en aplicaciones industriales como:

- * Medición de espesores.
- * Detección e identificación de discontinuidades.
- * Localización de corrosión.
- * Determinación de características físicas de materiales.
- * Limpieza de materiales.
- * Control de calidad.
- * Medición de distancias. [3]

Un transductor ultrasónico se puede definir como un dispositivo que convierte una corriente eléctrica

en energía sonora o viceversa. Entre los principales parámetros que deben ser tenidos en cuenta a la hora de seleccionar un transductor de este tipo se tienen: la sensibilidad, resolución, frecuencia central y atenuación de la onda. [6]

2.2 Medición del espesor mediante el método de pulso eco

Este método se utiliza para medir el tiempo que tarda una onda ultrasónica en entrar y salir de un objeto sólido, ya que al encontrarse con una superficie exterior de fondo, se refleja un porcentaje de la onda. A esta porción de onda reflejada se le llama “eco”. Dicha onda es la que finalmente es registrada por el receptor.

El espesor de la pieza se determina midiendo el tiempo que la onda tardó en ir y regresar de un extremo al otro, teniendo en cuenta la velocidad de propagación del sonido dentro del material analizado. La figura 1 ilustra dicho método. [4][5]

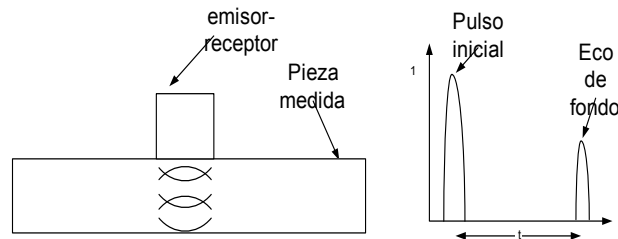


Figura. 1. Método de pulso eco. Una señal inicial tiene un pequeño eco de reflejo.

A partir de este método se define que el espesor de un material, es igual al producto entre la velocidad de propagación de la onda ultrasónica en el material y la mitad del tiempo en que se transmite. La ecuación 1 muestra esta relación:

$$E = \frac{V \times t}{2} \quad (1)$$

Donde:

E=espesor

V=velocidad

t=tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción

La tabla 1 muestra las velocidades de propagación de las ondas ultrasónicas en algunos de los materiales metálicos más comunes.

Tabla 1. Velocidad del sonido en materiales metálicos más comunes. Tomado de [3].

Material	Velocidad (m/s)
Acero	5918
Acero inoxidable	5664
Aluminio	6350
Hierro	5893
Níquel	5639
Oro	3251
Plata	3607
Platino	3962
Titanio	6096
Zinc	4216

2.3 Antecedentes

En la actualidad se ofrecen una gran variedad de medidores de espesores en el mercado; gran parte de estos equipos son completamente portátiles con sensores que trabajan a diferentes frecuencias y capaces de medir en distintos materiales como el vidrio. A continuación se detallan algunas de las ofertas comerciales más representativas.

2.3.1 Medidor ultrasónico Olympus NDT serie 35

La serie de medidores ultrasónicos que se muestran en la figura 2, ofrecen la facilidad de medir el material desde uno de los lados de la superficie. Son de formato de bolsillo con muy bajo consumo de energía y permiten la medición en diferentes materiales. Poseen pantalla de cristal líquido a contraluz y tienen opción de multilinguaje. La tabla 2 resume algunas de las características más destacables de este equipo.



Figura 2. Medidor ultrasónico Olympus NDT serie 35 de la empresa Parametrics. Tomado de [8].

Tabla 2. Especificaciones del Medidor ultrasónico Olympus NDT serie 35

Característica	Descripción
Frecuencia	5 MHz-10MHz
Modo	Eco simple-Eco múltiple
Rango de medición	0,08 mm a 635,0 mm
Resolución	0.01mm
Precio	€1129

2.3.2 Medidor TI 25LT

La figura 3 muestra otro medidor que permite la medición de materiales mediante el empleo del método de pulso-eco. Está diseñado para trabajar sólo con acero, aunque el fabricante ofrece la posibilidad de entregarlo con frecuencia variable para medición de otros materiales. Es portátil y posee una autonomía de hasta de 200 horas. La tabla 3 muestra sus principales características técnicas.



Figura 3. Medidor ultrasónico TI 25LT de la empresa ABQ. Tomado de [9].

Tabla 3. Especificaciones del equipo TI 25LT.

Característica	Descripción
Frecuencia	7.5 MHz
Modo	Eco simple-Eco múltiple
Rango de medición	1.00-150.0 mm
Resolución	0.04mm
Precio	€1244

2.4 Transductor ultrasónico GB TCE 10-5

Se utilizó este transductor ultrasónico principalmente por tener una frecuencia central de 5MHz indicada para materiales metálicos y por tener canales independientes para la transmisión y recepción lo cual facilita ambos procesos. Las especificaciones técnicas del transductor son mostradas en la tabla 4 y su configuración física y dimensiones en la figura 4.

Tabla 4. Especificaciones del transductor ultrasónico

Parámetro	Descripción
Frecuencia	5 MHz
Impedancia	Tx 25 Ω , Rx 100 Ω
Dimensiones	Largo 3.2cm. Diámetro 1.8 cm
Peso	10 gr
Conectores	Subvis, BNC
Tipo de transmisión	Bidireccional
Superficie Transmisora	Radio=0,8mm

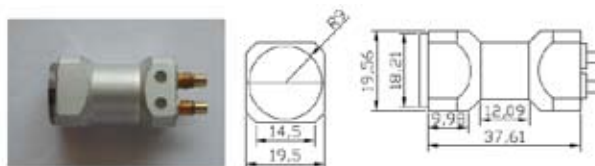


Figura 4. Transductor ultrasónico GB referencia TCE 10-5

3. RESULTADOS

3.1 Descripción general del diseño propuesto

La arquitectura general del sistema se ha dividido en cinco bloques funcionales, los cuales se pueden observar en la figura 5 y se describen a continuación.

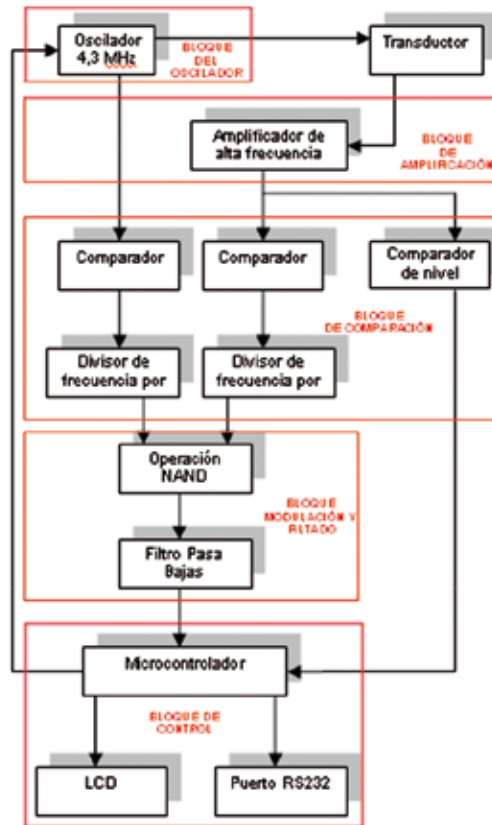


Figura 5. Diagrama de bloques.

3.1.1 Oscilador

Es el encargado de generar la señal de excitación del transductor [7]. La señal generada es de tipo sinusoidal de frecuencia de 4.43 MHz y amplitud de 21Vpp la cual excita al sensor ultrasónico para enviar la señal pulso y retornar la señal eco. La figura 6 ilustra el esquemático de dicho bloque.

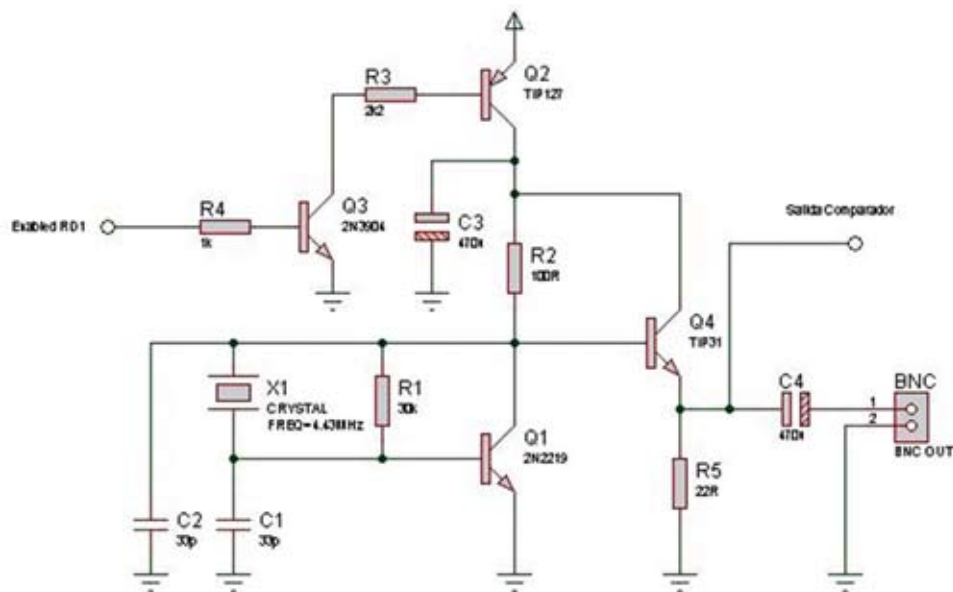


Figura 6. Diagrama esquemático del oscilador. Por medio de un cristal de 4.43MHz y transistores se genera la señal sinusoidal de excitación.

3.1.2 Bloque de amplificación

La señal de entrada de este bloque es la señal eco proveniente del sensor. La amplitud de esta señal es del orden de los milivoltios por lo que es indispensable amplificarla a valores entre 0 y 5V para el posterior procesamiento por el microcontrolador. Este bloque (figura 7) es el encargado de amplificar dicha señal por medio de los amplificadores operacionales OPAMP LM7171. La ganancia de un amplificador con la configuración propuesta es igual al cociente entre la resistencia de retroalimentación y la resistencia de entrada.

$$A = \frac{R_{ret}}{R_{in}} \quad (2)$$

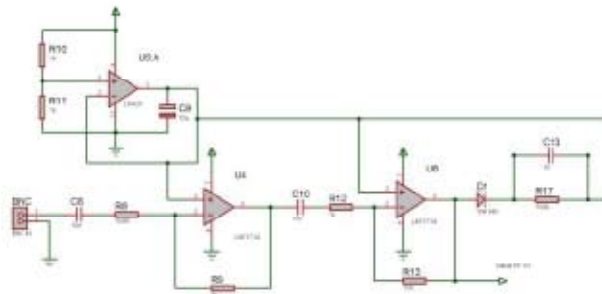


Figura 7. Diagrama esquemático de bloque de amplificación. OPAMP en cascada amplifican la señal eco 450 veces.

3.1.3 Bloque de comparación

Al bloque de comparación entran independientemente tanto una señal digital en fase con la de transmisión, como la de recepción previamente amplificada. El bloque de comparación tiene dos circuitos: un comparador y un divisor de frecuencia. La función del comparador es digitalizar la señal proveniente del amplificador, obteniendo así una señal digital con la misma frecuencia que la señal de excitación pero desfasada. Dicho desfase es ocasionado por el tiempo de vuelo de la onda ultrasónica en el interior del material y es proporcional al espesor del mismo. Estas señales de salida se dirigen al circuito de división de frecuencia con el fin de facilitar las operaciones posteriores.

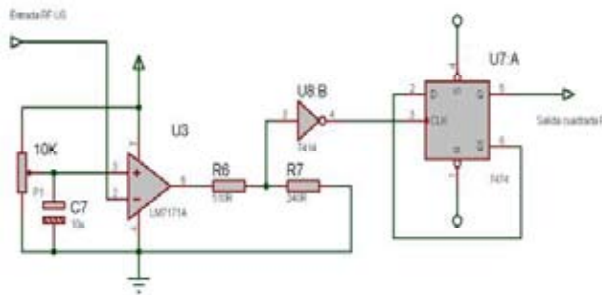


Figura 7. Diagrama esquemático bloque de comparación y divisor de frecuencia.

En la figura 8, se visualizan alternadamente las señales de transmisión y recepción ya digitalizadas. Es posible apreciar el desfase que hay entre ambas señales. De esta figura se destaca, además, que a pesar de utilizar componentes especializados en el manejo de altas frecuencias, no fue posible obtener señales completamente cuadradas.

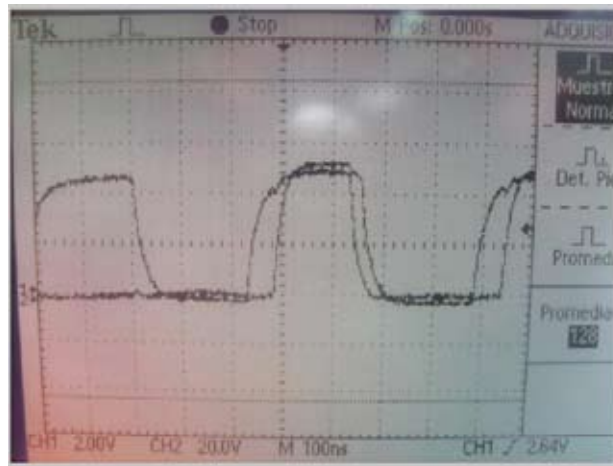


Figura 8. Comparación entre la señal de Tx y Rx digitalizada.

3.1.4 Bloque de modulación y filtrado

A este bloque llegan las dos señales digitales desfasadas para obtener luego su producto lógico negado, generando una señal “Modulada en Ancho de Pulso” (PWM por sus siglas en inglés). Dicho pulso es rectificado mediante un circuito RC, obteniendo un voltaje proporcional al desfase de las señales. (Vea la figura 9)

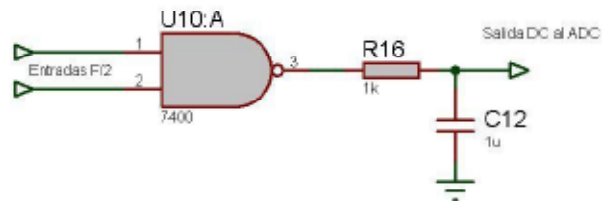


Figura 9. Diagrama esquemático del bloque de modulación y filtrado.

3.1.5 Bloque de control

El bloque de control (figura 10) es el encargado de recibir la señal DC del bloque de modulación y filtrado, para efectuar la conversión análoga digital y el procesamiento de los datos para su posterior visualización en un LCD y trasmisión por el puerto serial al PC.

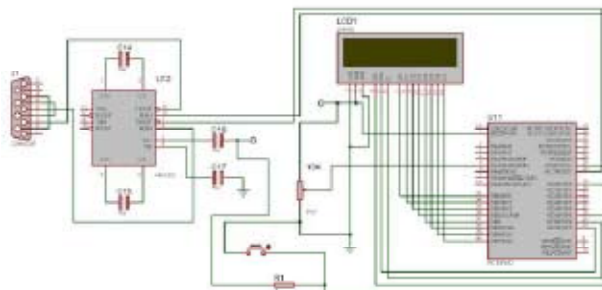


Figura 10. Diagrama esquemático del bloque de control. Consta de un microcontrolador, un LCD y una interfaz RS232.

3.2 Diagrama esquemático general

El funcionamiento general del circuito se resume en: generación de la señal de excitación del transductor, recepción y amplificación, digitalización mediante un comparador, división de frecuencia,

modulación y filtrado, conversión analógica digital y por último la etapa de visualización y transmisión de datos se encarga de poner a disponibilidad del usuario las lecturas del dispositivo.

3.3 Simulaciones e implementación final.

En la figura 11, se observa la simulación de las dos entradas, la señal de color amarillo representa la señal de transmisión Tx que no varía su fase, mientras que la señal de color verde representa la señal de recepción Rx la cual tiene un desfase de 90° . La señal azul representa la salida del PWM y se observa que tiene ciclo útil del 60%. La señal roja representa la señal DC y el voltímetro indica una magnitud de 2,763 V. Finalmente, la tabla 5 resume las principales características del equipo implementado.

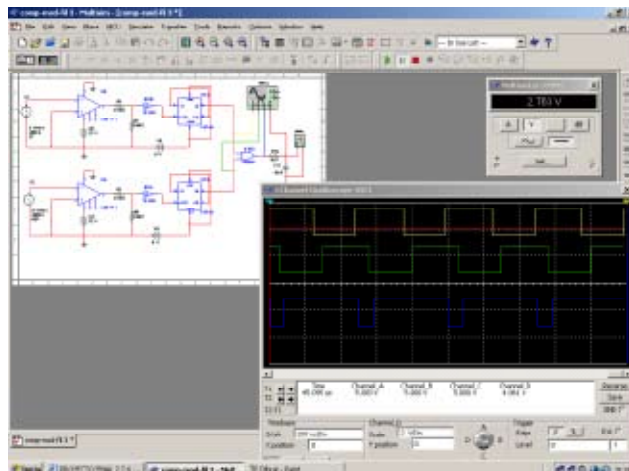


Figura 11. Simulación para 90° de desfase. Señal de Tx (amarillo), señal de Rx (verde), voltaje de salida (rojo)

Tabla 5. Especificaciones generales del equipo.

Característica	Descripción
Frecuencia	4.43 MHz
Tipo baterías	24 V 1.2 A
Dimensiones	22 cms x18 cms x 8.5 cms
Peso	800 grs.
Consumo de energía	24 W
Alimentación	2 Baterías de 12 V 1.2 A y Red de energía eléctrica
Conectores	Subvis y BNC
Duración de baterías	Trabajando al máximo 1 h
Unidades de medición	Milímetros
Tiempo de carga	12 h
Rango de medición	De 10 a 25 mm.
Estructura exterior	Caja plástica
Material de medición	Aluminio (Al) 6063
Resolución	5mm

3.4 Diseño experimental

El transductor seleccionado está especialmente diseñado para trabajar en aleaciones de aluminio. En el diseño del experimento se seleccionó el aluminio 6013 (Vea [10]), teniendo en cuenta su bajo costo y fácil adquisición. La superficie de la pieza a medir debe encontrarse lisa y con la menor cantidad de fisuras posibles, ya que la propagación de la onda se puede ver afectada por estas discontinuidades.

Se requiere la utilización de un material conductor entre los medios conocido como “agente acoplante”, que permite la mejor propagación de la onda entre el sensor y el metal sometido a prueba. Para esta labor pueden utilizarse vaselina o algunos otros lubricantes comunes, aunque en general se obtuvieron mejores resultados con lubricantes no grasos.

Se fabricó una probeta de prueba de 6 escalones con intervalos de 5mm; el rango mínimo se estableció desde 5mm hasta un máximo de 30 mm; en cada uno de los niveles se aplicó de manera uniforme el agente acoplante, se procedió a realizar las mediciones y el análisis de efectividad del equipo en cada uno de los niveles de la escalera de pruebas.

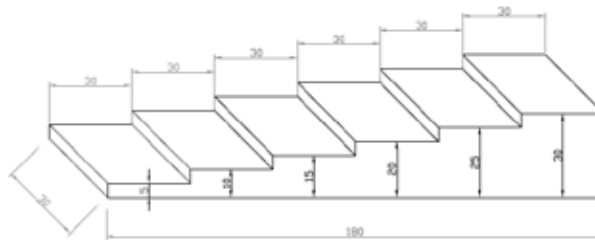


Figura 13. Escalera para mediciones. Consta de seis niveles cada uno de 3 cms por 3cms de área.

3.5 Pruebas y análisis

Con el medidor de espesores metálicos conectado al computador y visualizando en sesión de hiperterminal, se coloca 30 veces el sensor en cada posición de la escalera para la toma de muestras.

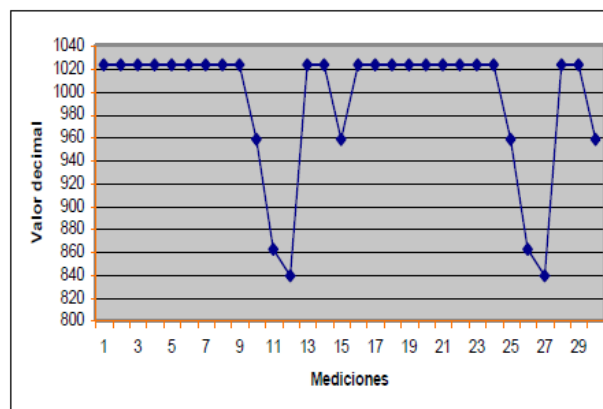


Figura 14. Nivel 1 (5mm)

Para el nivel 1 (5 mm), el valor de la media aritmética está fuera del rango (300 a 309 unidades), la desviación estándar de 60 unidades no es aceptable y la probabilidad de que un valor esté dentro del rango es nula.

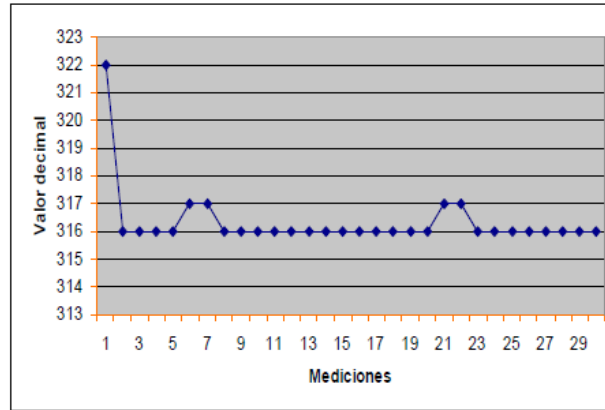


Figura 15. Nivel 2 (10mm)

Para el nivel 2 (10 mm), el valor de la media aritmética esta dentro del rango (310 a 316 unidades), la desviación estándar es aceptable (1 unidad aprox.) y la probabilidad que un valor este dentro del rango es del 80%.

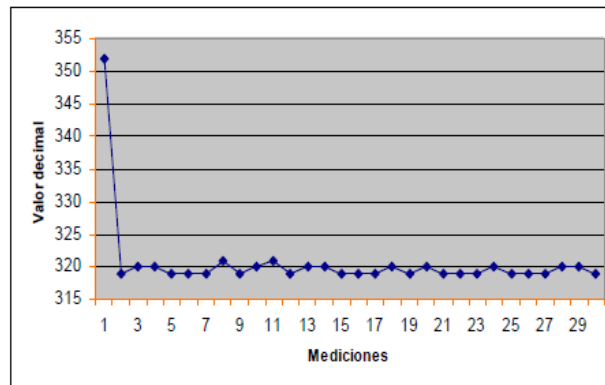


Figura 16. Nivel 3 (15mm)

Para el nivel 3 (15 mm), el valor de la media aritmética esta dentro del rango (317 a 330 unidades), la desviación estándar es aceptable de aproximadamente 6 unidades y la probabilidad que un valor este dentro del rango es del 96%.

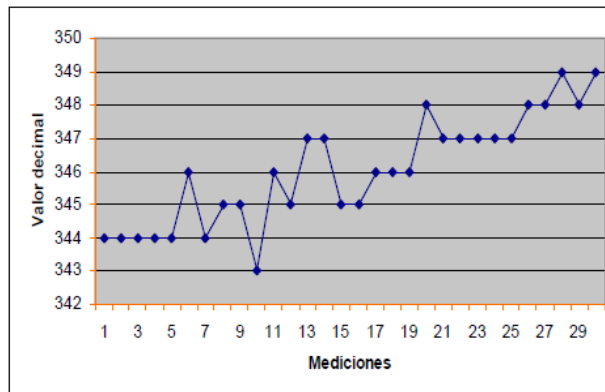


Figura 17. Nivel 4 (20mm)

Para el nivel 4 (20 mm), el valor de la media aritmética esta dentro del rango (331 a 370 unidades), la desviación estándar es aceptable (2 unidades aprox.) y la probabilidad que un valor este dentro del rango es del 93%.

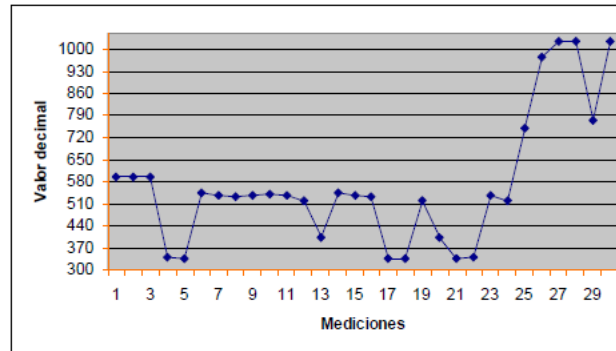


Figura 18. Nivel 5 (25mm)

Para el nivel 5 (25 mm), el valor de la media aritmética está fuera del rango (371 a 550 unidades), la desviación estándar es pésima (200 unidades aprox.) y la probabilidad que un valor esté dentro del rango es relativamente baja. (50%).

3.6 Análisis estadístico

A partir de las tablas de datos de pruebas se realizó un análisis estadístico por medio de las principales variables estadísticas tales como la media aritmética, la desviación estándar y la función probabilidad. Estos datos se registraron en la tabla VI.

Tabla 6. Análisis estadístico

	Media aritmética \bar{x}	Desviación estándar $(\sqrt{\sigma^2})$	Función probabilidad $P(a \leq x \leq b)$
Nivel 1 (5mm)	991,333	60,563	$P(300 \leq \bar{x} \leq 309) = 0$
Nivel 2 (10mm)	316,333	1,124	$P(310 \leq \bar{x} \leq 316) = 0,833$
Nivel 3 (15mm)	320,567	5,970	$P(317 \leq \bar{x} \leq 330) = 0,967$
Nivel 4 (20mm)	346,033	1,650	$P(331 \leq \bar{x} \leq 370) = 0,933$
Nivel 5 (25mm)	571,467	207,670	$P(371 \leq \bar{x} \leq 550) = 0,5$

4. DISCUSIÓN

El experimento diseñado para probar el funcionamiento del equipo simplemente tenía como objetivo determinar el rango de operación del equipo. Se encontró que con el grado de desarrollo actual del prototipo, fue posible diferenciar 3 de los espesores propuestos comprendidos entre 10 y 20 milímetros. Así mismo, pruebas adicionales no entregaron buenos resultados para valores comprendidos dentro de este rango, por lo que se concluyó que la mejor resolución obtenida fue de 5mm.

4.1 Análisis de desempeño frente a desarrollos comerciales

Los valores de exactitud y precisión obtenidos para el equipo desarrollado están aun muy por encima de los obtenidos por equipos comerciales disponibles [8][9], que están por el orden de una centésima de milímetro. Además, estos desarrollos tienen la posibilidad de operar a distintas frecuencias y con diferentes materiales, mientras que la operación del prototipo propuesto en este trabajo se limita a una única aleación de aluminio determinada.

Así mismo, es importante destacar que el rango de medida alcanzado en este trabajo (de 10 a 20mm) es mucho más reducido que sus contrapartes comerciales. (Vea tablas 2 y 3).

4.2 Análisis de desempeño frente a los componentes utilizados

La poca resolución y reducido rango de medida del equipo diseñado se atribuyen principalmente a la dificultad de trabajar con frecuencias relativamente altas para los componentes de bajo costo utilizados. Esta dificultad se aprecia claramente en la figura 8, que muestra las dos señales desfasadas que, idealmente, deberían ser digitales.

Así mismo, se deberán utilizar componentes y circuitos especializados en manejo de altas frecuencias para mejorar la “forma” de las señales obtenidas, hecho que, seguramente mejorará la resolución del equipo.

Sin embargo, a pesar de la baja calidad de las señales comparadas, el método de medición de desfase mediante el convertidor de desfase a voltaje propuesto permitió diferenciar entre tres espesores diferentes lo que lo hace prometedor para una futura segunda implementación.

5. CONCLUSIONES

Fue posible desarrollar un primer prototipo capaz de diferenciar entre tres distintos espesores para una aleación de aluminio. Sin embargo, la resolución aún es pobre, lo que plantea la necesidad de futuros desarrollos.

La adquisición del transductor en el mercado local resultó bastante compleja. Así mismo la de los componentes especializados en el manejo de altas frecuencias. Esto elevó notablemente los costos de implementación.

El método de medición de desfase mediante el convertidor de desfase a voltaje resultó ser una alternativa muy atractiva dado que, a pesar de la gran cantidad de ruido adicionado a la señal ultrasónica por la propagación en el medio y al escaso filtrado, fue posible obtener lecturas correctas de el espesor en el material de prueba dentro de un rango determinado.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Moreno, *Propagación de Ondas Mecánica y Aplicaciones de los Ultrasonidos*. Centro de Ultrasonica. La Habana, Cuba.
- [2] J. Blitz, *Fundamentals of Ultrasonics*. Second Edition. Department of Physic, Brunel University, Londres. 1967.
- [3] *Ultrasonic Testing ASNT, Non-destructive Testing Handbook*. Second Edition. Volumen 7. Ed Paul McIntire 1991.
- [4] O. Martínez, *Procesamiento Digital de Señales Ultrasónicas en END*. Instituto de Automática Industrial. CSIC. Madrid España.
- [5] H. Krautkramer, *Ultrasonic Testing of Materials*. Third Edition. Springer-Verlag, Berlin, New York. 1983.
- [6] R. Pallán, *Sensores y Acondicionadores de Señal*. Alfaomega. Tercera Edición. 2000.
- [7] M. Rashid, *Circuitos Microelectrónicos*. Primera edición. 1999. Thomson editores. Universidad de Florida.
- [8] Olympus Inc. NDT serie 35. Tabla de especificaciones. Disponible en <http://www.olympus-ims.com>. Fecha de consulta 15-09-08.
- [9] Albuquerque Industrial Inc. TI-25LT. Tabla de especificaciones. Disponible en http://www.abqindustrial.com/spanish/wall_thickness_gauges/ti25m.html. Fecha de consulta 15-09-08.
- [10] <http://www.electrocome.com/al6063.htm>. Fecha de consulta 25-10-08.