

Sistema ultrasónico para inspección automática de componentes industriales por inmersión

Rogelio Amezola Luna, Ana Lilia López Sánchez, Alfredo Arturo Elías Juárez

Laboratorio de Ultrasonido, Centro Nacional de Metrología (CENAM).
Carretera a Los Cués km.4.5, El Marqués, Querétaro, México. 76246.

e-mail: ramezola@cenam.mx, alopez@cenam.mx, aelias@cenam.mx

Resumen. Se presenta un sistema para inspección no destructiva, diseñado y desarrollado en el Centro Nacional de Metrología (CENAM), para operar por técnicas ultrasónicas por inmersión, utilizando arreglos como pulso-eco y transmisión directa. El sistema puede configurarse para determinar la sanidad de materiales y soldaduras, en piezas que van desde microcomponentes electrónicos hasta la detección de fallas en piezas de geometrías complejas de hasta 1 m de longitud. Mediante este sistema es posible correlacionar propiedades acústicas del material con características inherentes, e.g., porcentaje de nodularidad en hierro, sin necesidad de preparar o destruir el componente. También es posible determinar la velocidad del sonido y caracterizar muescas internas de bloques de referencia usados en mediciones ultrasónicas (e.g. de pasos, IIW, 30FBH, área-amplitud y distancia-amplitud). La versatilidad del sistema permite evaluar la sanidad de componentes industriales de manera automática; particularmente cuando no es factible su inspección por técnicas ultrasónicas tradicionales de contacto directo (pudiendo utilizar transductores de hasta 100 MHz). Se presentan casos de éxito y resultados obtenidos al utilizar este sistema en aplicaciones industriales.

1. Introducción

Como es bien sabido, las técnicas de medición por ultrasonido se han utilizado desde hace ya varias décadas en diferentes aplicaciones médicas e industriales, particularmente como herramientas de diagnóstico o inspección. Su principio de medición basado en la propagación de vibraciones mecánicas de alta frecuencia (mayores a 20 kHz) en medios elásticos, e.g., materiales en estado gaseoso, líquido o sólido; ha dado lugar a una amplia gama de aplicaciones. Una de sus características que ha propiciado la diseminación de sus aplicaciones, es que cuando las ondas de ultrasonido se propagan a través de un medio, y se encuentran con otro medio de propiedades acústicas diferentes (e.g., impedancia acústica), una parte la energía tiende a desviarse o regresar a la fuente en una especie de “eco”. Si se mide el tiempo que tardan estas ondas de ultrasonido en viajar a través del material y reflejarse al punto de origen u otro conocido, entonces se puede estimar la longitud de la trayectoria recorrida, en el entendido que se conoce la velocidad de propagación del ultrasonido en el material. La trayectoria así calculada se relaciona, por ejemplo, con un espesor o con la profundidad de una falla en el material; a partir de la cual se obtiene información relevante para evaluar su sanidad interna [1].

Puede afirmarse que la inspección no destructiva de materiales y componentes industriales por ultrasonido tiene su fundamento físico en la interacción de las ondas ultrasónicas con el medio de propagación; siendo posible evaluar la sanidad interna de un material sin deteriorarlo ni alterar o afectar de forma permanente sus propiedades físicas o químicas, como en el caso de las pruebas destructivas. En el ámbito nacional, son

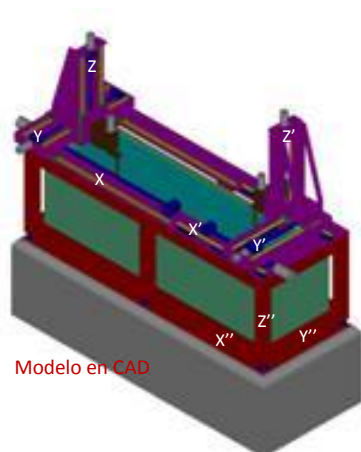
relativamente pocas las organizaciones o empresas dedicadas al desarrollo y fabricación de sistemas de inspección por ultrasonido. Las empresas locales que cuentan con sistemas de inspección “llave en mano”, generalmente son sistemas desarrollados por empresas extranjeras. Aun cuando localmente existe la experiencia y conocimiento de diversas técnicas de medición por ultrasonido, no se percibe un desarrollo sobresaliente en el diseño, integración y/o construcción de sistemas de inspección por ultrasonido hechos en México. Ante esta situación y considerando las necesidades de la industria manufacturera, el Laboratorio de Ultrasonido del Centro Nacional de Metrología (CENAM) ha desarrollado sistemas automáticos de inspección no destructiva por ultrasonido. Uno de los cuáles se presenta en este trabajo, con particular énfasis en técnicas ultrasónicas por inmersión en medios acuosos, utilizando arreglos como pulso-eco y transmisión directa.

Las siguientes secciones describen, de manera general, sus características de diseño, capacidades de medición y campos de aplicación en donde el sistema de inspección ha sido probado con éxito.

2. Diseño del sistema de inspección ultrasónico

El sistema ultrasónico fue diseñado para inspeccionar piezas de geometrías complejas, con dimensiones desde algunos milímetros hasta más de 1 m de longitud. Esto es, un sistema apto para la detección de fallas con resoluciones micrométricas o milimétricas, dependiendo de la aplicación. El sistema se diseñó con una estructura metálica, acoplada a otra ahogada en concreto con aislamiento de vibración, para reducir el efecto de vibraciones no deseadas provenientes de fuentes cercanas (e.g. peatones, manejadoras de aire acondicionado u otra maquinaria rotativa o reciprocante). El acoplamiento entre ambas estructuras se llevó a cabo empleando pares cinemáticos autoalineadores para prevenir efectos por variaciones de temperatura, reacondo estructural o fuerzas ajenas al sistema. La estructura metálica sostiene dos puentes de posicionamiento, uno de ellos automatizado con movimientos de translación XYZ y dos grados de libertad rotatorios (ver Figura 1). Este eje automatizado se controla vía una interfaz de comunicación desarrollada en software LabView; desde la cual se elaboran y ejecutan los programas de movimiento del sistema, específicos para el tipo de inspección requerida. La resolución nominal de posicionamiento lineal automático es de 1 micrómetro; aunque en la práctica la repetibilidad obtenida varía de 2 a 12 micrómetros en el intervalo completo de desplazamiento de cada eje y de 1 a 2 micrómetros en intervalos cortos (menores a 20 mm). El sistema cuenta con un tanque de inmersión, que contiene el medio donde se sumerge la pieza a inspeccionar y se realizan los barridos automáticos. Por lo general se utiliza agua como acoplante acústico, aunque a veces es necesario agregar algún agente anticorrosivo. El segundo puente de posicionamiento es de características manuales, con 3 grados de libertad lineales y 2 angulares, y se emplea en el posicionamiento y sujeción de la pieza bajo inspección o de transductores utilizados en las técnicas de transmisión directa o envío-recepción con 2 transductores, ver Tabla 1 [2,3].

En el extremo de cada uno de los puentes de posicionamiento se monta el transductor o pares de transductores (dependiendo de la técnica a utilizar). Los transductores ultrasónicos son alimentados a través de un módulo pulsador-receptor de alta frecuencia (con un ancho de banda de 200 MHz), el cual puede operar utilizando un solo transductor (pulso-eco) o 2 transductores (transmisión directa o envío-recepción). El pulsador-receptor excita eléctricamente al transductor piezoeléctrico, y éste a su vez genera un haz de ultrasonido cuyas ondas se propagan a través del agua y al interior del material. Cuando el ultrasonido se refleja (eco) debido a un cambio de medio (e.g. una falla), éste regresa al transductor, el cuál convierte la energía mecánica (ultrasonido) en energía eléctrica, nuevamente. Esta señal eléctrica es monitoreada con un osciloscopio digital de alta frecuencia. En el caso de técnicas con 2 transductores, uno de ellos genera el ultrasonido y el otro lo recibe y lo convierte en señales eléctricas. Se desarrolló una interfaz de comunicación en software LabView y Matlab, para capturar y recibir de forma automática las señales eléctricas, y analizarlas de acuerdo a la aplicación (e.g. medición de espesores, detección de fallas, determinación de nodularidad en hierro, etc.).



Modelo en CAD



Figura 1. Sistema ultrasónico para inspección automática de componentes industriales por inmersión (CENAM).

El sistema evalúa la sanidad de componentes industriales de manera automática; particularmente cuando no es factible su inspección por técnicas ultrasónicas tradicionales de contacto directo (pudiendo utilizar transductores de hasta 100 MHz). La evaluación se realiza por medio de barridos en planos rectos, así como con movimientos curvos para piezas circulares, como barras o tubos, o en forma puntual sobre la pieza.

Las especificaciones del sistema de inspección desarrollado son las mostradas en la tabla siguiente (ver Tabla 1).

Tabla 1. Especificaciones del sistema ultrasónico para inspección

Sistema ultrasónico para inspección	Puente Automatizado				
	Eje de Movimiento	Límite Inferior	Límite Superior	Resolución Nominal	Repetibilidad En Ejes*
	Eje X	0 mm	997 mm	0.001 mm	0.012 mm
	Eje Y	0 mm	400 mm	0.001 mm	0.012 mm
	Eje Z	0 mm	300 mm	0.001 mm	0.012 mm
	Eje R1	0°	360°	0.1°	0.25°
	Eje R2	-45°	+ 45°	0.25°	0.5°
	Puente No Automatizado				
	Eje X'	0 mm	498.5 mm	0.1 mm	0.25 mm
	Eje Y'	0 mm	400 mm	0.1 mm	0.25 mm
	Eje Z'	0 mm	300 mm	0.1 mm	0.25 mm
	Eje R1'	0°	360°	0.25°	0.5°
	Eje R2'	-45°	+ 45°	0.25°	0.5°
	Tanque de Inmersión				
	Eje X''	0 mm	1500 mm	---	---
	Eje Y''	0 mm	600 mm	---	---
	Eje Z''	0 mm	500 mm	---	---
	Transductores				
	Frecuencias	(1 a 100) MHz			
	Enfoque	plano, cilíndrico, esférico			
	Tamaño	(3 a 38) mm diámetro			
	Pulsador-receptor				
	Frecuencias	1 kHz a 200 MHz			
	Pulso	Negativo (spike)			
	Canales	Emisor y receptor (con sincronizador)			
	Osciloscopio				
	Ancho de banda	500 MHz			
	Canales	4			

*Varía dependiendo el intervalo de desplazamiento del eje y la distancia al transductor.

3. Casos de éxito: Aplicaciones del sistema de inspección ultrasónica

A continuación se presentan algunos casos de éxito y resultados obtenidos al utilizar el sistema de inspección desarrollado en diversas aplicaciones industriales.

Microscopía acústica

El sistema tiene la capacidad de realizar barridos de elementos pequeños, a través de técnicas C-Scan, en una especie de “microscopio de interiores”, que es capaz de visualizar planos de interés sobre la superficie o dentro del material o componente. El sistema envía una señal ultrasónica a través del agua, una parte de la energía se refleja en la superficie de la pieza bajo inspección y otra parte se transmite al interior de la pieza. Si en el interior se detecta un cambio de impedancia acústica del medio (e.g. aire o gas atrapado), el sistema lo identifica como ausencia del material base y lo presenta gráficamente como una falla en el interior a través de cambios de color en la imagen. Esta aplicación es de suma utilidad cuando se desea inspeccionar componentes muy pequeños de una forma no destructiva, como soldaduras en cables o microcomponentes electrónicos. En la Figura 2a se muestra el arreglo de barrido C-Scan, donde se utilizó un transductor de 50 MHz de frecuencia central, enfocado en un punto con línea de retardo. La pieza se sumergió en un pequeño recipiente con agua destilada y bajo contenido de oxígeno disuelto [4].

La Figura 2b muestra el caso de una moneda, donde se ha realizado un barrido superficial con el sistema desarrollado, y se ha generado una imagen por ultrasonido de su cara frontal (imagen inferior en gris), utilizando una resolución de barrido de 50 μm se pueden observar detalles en relieve sobre la superficie inferiores a 15 μm . La Figura 2c presenta la imagen de barrido de un componente electrónico (microcontrolador de montaje superficial), donde se pueden identificar características superficiales en la resina y de unión en las terminales metálicas (círculos en rojo), se utilizó una resolución de barrido de 100 μm . En la Figura 2d se muestra una placa de cobre adherida sobre una base plástica, donde se pueden observar imperfecciones en el pegado debido a aire atrapado (en color rojo), se utilizó una resolución de barrido de 100 μm .

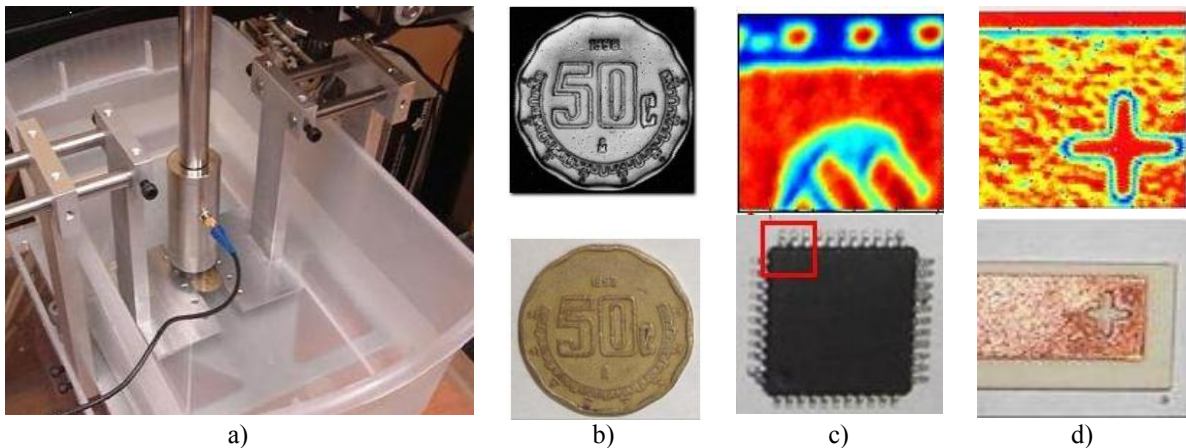


Figura 2. Aplicación del sistema de inspección en microscopía acústica

Con la finalidad de identificar las mejores capacidades de inspección del sistema, se utilizó un rugosímetro calibrado para medir el cambio de perfil superficial mínimo que el sistema es capaz de detectar en una pieza bajo inspección. Las mediciones realizadas arrojaron un valor mínimo de $12 \mu\text{m} \pm 3 \mu\text{m}$, entre puntos de crestas y valles sobre una superficie con relieves. Es de esperarse que este valor será dependiente de las características acústicas y metalográficas del material a inspeccionar y la profundidad de penetración donde se realice el barrido (por la atenuación e impedancia acústica de la pieza bajo inspección). Dependiendo del número de puntos o resolución de barrido, el proceso de inspección de este tipo de componentes puede requerir varios minutos.

Soldaduras de resistencia de puntos y laser

Por la configuración del sistema de inspección puede programarse para acoplarse a superficies de geometría compleja y evaluar la sanidad de puntos o cordones de soldadura a través del uso de técnicas de pulso-eco. Para este arreglo del sistema se utiliza agua como medio de acoplamiento y transductores de diferentes áreas de enfoque y frecuencias de operación.

Para el caso de soldaduras de resistencia de puntos en láminas delgadas, se hace incidir un haz de ultrasonido directamente sobre el punto y se identifican “ecos” provenientes de una soldadura deficiente, como por ejemplo de la presencia de poros, incrustaciones o falta de fusión; así como ecos provenientes de pared posterior (ver Figura 3). Así mismo, a través de la medición de la atenuación aparente, es posible relacionar los ecos de pared posterior con el cambio metalográfico de la soldadura derivado de la fusión del material durante el proceso de soldado a través del paso de la corriente eléctrica por los electrodos. Si cambia la estructura metalográfica por el proceso de soldado, cambia la atenuación del material. En esta aplicación, el tamaño del área del haz de ultrasonido juega un papel importante en una evaluación confiable, ya que una selección incorrecta del transductor o posicionamiento inadecuado del mismo puede dar lugar a falsos positivos o falsos negativos. Las mediciones realizadas con el sistema muestran que es posible inspeccionar uniones de láminas soldadas a partir de 1 mm, utilizando transductores de inmersión de (10 a 25) MHz; en donde el tamaño de falla mínimo detectable es alrededor de 0.2 mm. Por otra parte, para la profundidad de falla se obtuvo una incertidumbre estándar combinada de medición cercana a ± 0.05 mm, dependiendo de la profundidad y características del material en la zona de fusión [5].

En el caso de un cordón de soldadura láser, la inspección se realiza incidiendo una onda de ultrasonido en forma perpendicular o angulada al cordón, analizando los “ecos” en la zona de soldado y correlacionándolos con la sanidad de la soldadura. Bolsas de gas atrapado es un tipo de falla común en estas soldaduras, así como las quemaduras o falta de fusión. El sistema permite inspeccionar soldaduras en diversas geometrías, incluidas las circulares o de contornos irregulares, como el caso de soldaduras láser en carrocerías automotrices o engranes de transmisión mecánica. La inspección de uniones de láminas soldadas es viable a partir de 1 mm (o 0.5 mm en unión a tope), utilizando transductores de inmersión de (5 a 25) MHz. Las características de inspección en este tipo de soldaduras (tamaño mínimo y profundidad de falla) son similares que para el caso de soldaduras de puntos.

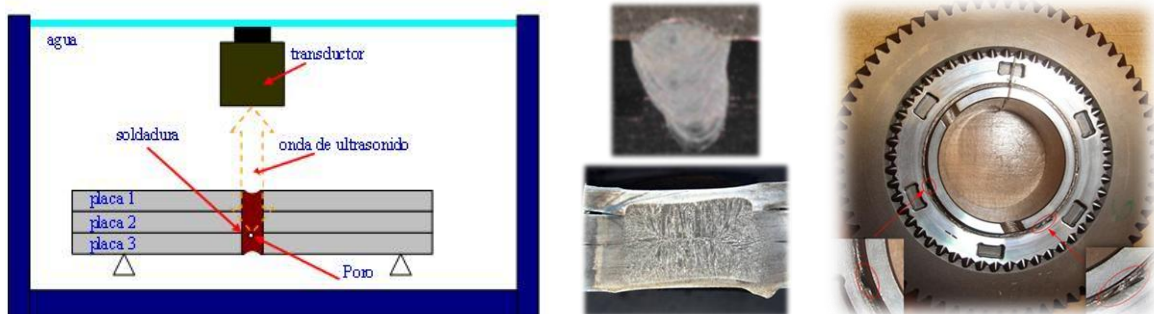


Figura 3. Aplicación del sistema de inspección en la evaluación de soldaduras laser y de resistencia de puntos

Nodularidad en hierro

La nodularidad es una característica metalográfica asociada con la resistencia mecánica de un material o componente de hierro nodular; de ahí la importancia de cuantificarla [6]. Utilizando un método no-destructivo por ultrasonido, en base a la medición de la velocidad del sonido y el coeficiente de atenuación de un material, es posible establecer el porcentaje de nodularidad de la pieza [7]. En la gráfica de la Figura 4 se observan los resultados de la medición de velocidad del sonido de 19 muestras de hierro nodular de componentes del sistema de frenado y suspensión de un automóvil, cada uno de los grupos de colores de las barras verticales proviene de diferentes lotes de fundición y se correlaciona con una nodularidad diferente.

En la Figura 5 se muestra un gráfico que correlaciona la velocidad del sonido de varias probetas de hierro nodular, con respecto al número de nódulos de grafito formados por unidad de área (1 mm^2). Las muestras

proviene de 6 componentes mecánicos de suspensión automotriz, de los cuales se extrajeron 2 probetas de cada uno. Se observa una tendencia de agrupamiento en muestras que provienen de la misma pieza de fundición (líneas en color rojo). La velocidad del sonido se determinó con una incertidumbre estándar combinada de 5 m/s.

Para realizar las mediciones se aplicaron técnicas de pulso eco y de transmisión directa con 2 transductores de 5 MHz de haz recto, por inmersión en agua. Las mediciones de nodularidad se determinaron tanto a través de técnicas de metalografía utilizando un microscopio óptico, como mediante la correlación de características acústicas de las piezas medidas con el sistema ultrasónico. Los resultados muestran la viabilidad del sistema para utilizarse en un proceso automático de medición de nodularidad en una línea de producción, retroalimentando al proceso de fundición; previa validación a través de técnicas destructivas metalográficas. La medición de la velocidad del sonido es un proceso de inspección muy rápido; una vez colocada la pieza o componente de interés en el sistema.

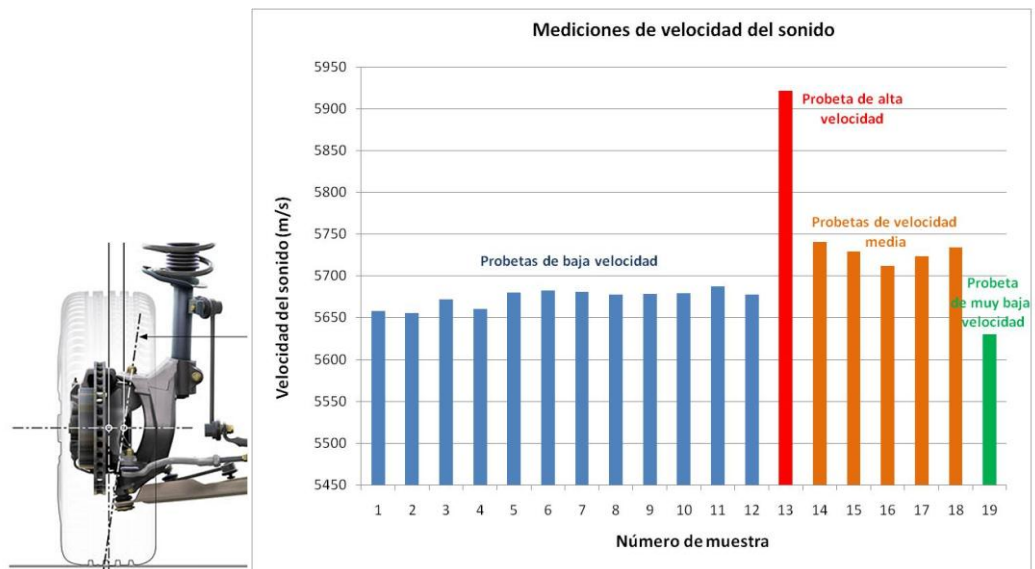


Figura 4. Aplicación del sistema ultrasónico en la medición de velocidad del sonido para determinar nodularidad en hierro

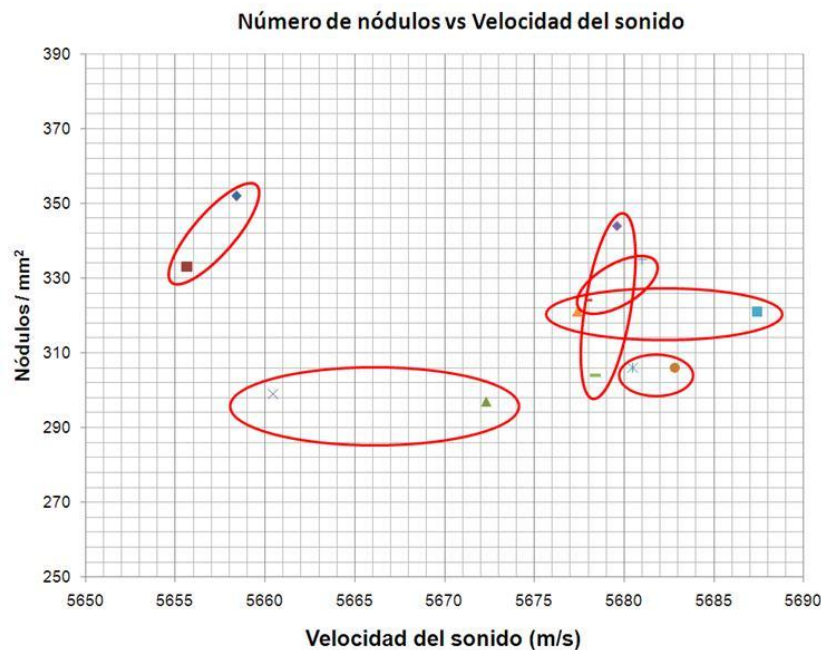


Figura 5. Correlación del número de nódulos por área con respecto a la velocidad del sonido de la pieza

Caracterización de bloques de referencia en ultrasonido

Como ejemplo del tipo de bloques de referencia usados en mediciones ultrasónicas que es posible caracterizar con el sistema de inspección referido, están los siguientes:

- Bloques de pasos (tipo escalón) o bloques IIW, donde se determina la velocidad del sonido longitudinal y transversal. Típicamente, un inspector calibra este tipo de bloques por métodos dimensionales, sin embargo supone su valor de velocidad del sonido como una constante conocida (e.g. de tablas). Si ésta difiere considerablemente de la velocidad del sonido de la pieza que inspecciona, entonces podría dar lugar a errores sistemáticos cuando realiza la evaluación.
- Bloques 30FBH, área-amplitud y distancia-amplitud, donde se determina la velocidad del sonido longitudinal, así como la localización de las muescas interiores de referencia. Al igual que el caso anterior, el inspector típicamente supone que la velocidad del sonido del bloque es conocida de tablas y las muescas internas se localizan conforme lo especificado por el fabricante y más aún, que no cambian con el tiempo. El sistema permite determinar estos valores y asegurar las características de medición de este tipo de bloques de referencia.

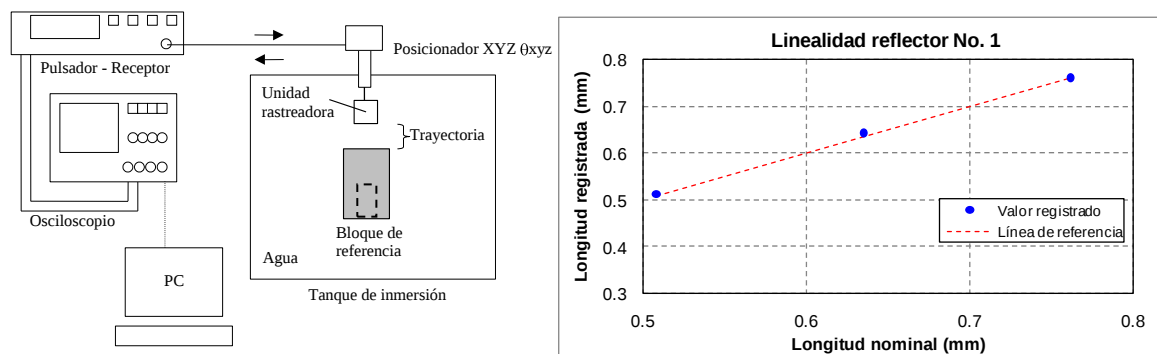


Figura 6. Arreglo para la caracterización de bloques de referencia para ultrasonido

Para realizar la caracterización de este tipo de bloques se utiliza el arreglo mostrado en la Figura 6, donde el sistema localiza la pared posterior del bloque (para medición de velocidad del sonido) y/o la muesca interna de referencia (para bloques con reflectores internos). A la derecha de la figura se muestra un gráfico de linealidad de un bloque de referencia con 3 reflectores ASTM No. 1, a diferentes profundidades. Se determina la diferencia entre el valor nominal de profundidad indicado por el fabricante y el valor medido con el sistema de inspección. El sistema es capaz de caracterizar bloques de referencia de espesores desde 0.05 mm a 600 mm, con tamaño de falla mínimos de 0.1 mm² e incertidumbre estándar combinada de 0.05 % o mayores, dependiendo de las características del bloque (material, espesor y tamaño de falla) [8,9].

Conclusiones

El sistema desarrollado, y puesto en operación en el CENAM, es un caso de éxito que ejemplifica la factibilidad de construir sistemas de inspección no destructiva por ultrasonido acordes a las necesidades de otros usuarios, facilitando con ello la inspección automática de una gran variedad de materiales y componentes. El sistema descrito puede operar en arreglos de uno (pulso-eco) o dos transductores (transmisión directa); con frecuencias de operación hasta de 200 MHz. Las capacidades de medición del sistema permiten inspeccionar microcomponentes electrónicos, soldaduras de resistencia de puntos y soldaduras láser de cordón; así como la determinación de porcentaje de nodularidad en hierro y la caracterización de bloques de referencia para ultrasonido.

Se considera que el sistema aquí referido está listo para su transferencia y aplicación en laboratorio o en líneas de producción que puedan incorporar una inspección por ultrasonido en la fabricación de materiales o componentes industriales. El sistema puede adaptarse a aplicaciones industriales en diferentes ramos manufactureros,

utilizando configuraciones de medición e instrumentación acordes a la necesidad técnica y operativa requerida del usuario final.

Referencias

- [1] Krautkramer, J. & - Krautkramer, H.; Ultrasonic testing of materials; (3a ed.^a ed.). New York: Springer - Verlag Berlin Herdelberg New York.
- [2] Amezola Luna R., Echeverría Villagómez J.S.; Diseño mecánico y construcción de un sistema para calibración en ultrasonido por inmersión. SOMIM 2000.
- [3] Amezola Luna R., Echeverría Villagómez J.S.; Design of a System for Calibration of Ultrasonic Transducers by Immersion. NCSL 2000.
- [4] Domínguez Durán Gustavo J. Tesis; Desarrollo y caracterización de un sistema de microscopía acústica para el Laboratorio de Ultrasonido del CENAM. CENAM 2007.
- [5] Rodulfo Pontigo R., Amezola Luna R.; Implantación de técnicas de ultrasonido por inmersión en la inspección de ensambles automotrices. Simposio de Metrología 2006.
- [6] C.H. Gür, B. Aydinmakina Ultrasonic investigation of graphite nodularity in ductile cast irons. DGZfP-JAHRESTAGUNG 2001.
- [7] M.A.Kenawy, A.M. Abdel -Fatah, N.Okasha and M.EL-Gazary. Ultrasonic Measurements and Metallurgical Properties of Ductile Cast Iron. Egypt. J. Sol., Vol. (24), No. (2), (2001).
- [8] ASTM E428-05a; "Standard practice for fabrication and control of metal, other than aluminum reference, blocks used in ultrasonic examination".
- [9] ASTM E127-07; "Standard Practice for Fabricating and Checking Aluminum Alloy Ultrasonic Standard Reference Blocks".