



INSPECCIÓN BAJO SOPORTES MEDIANTE ONDAS GUIADAS GENERADAS POR EMAT

Autores: Carlos Boyero Molina¹ y Víctor García Benavides²
¹cboyero@innerspec.com; ²vgarcia@innerspec.com
Innerspec Technologies Europe, S.L.

1. Introducción

La detección de pérdida de espesor en tuberías es una de las inspecciones más habituales debido a su evidente peligro en algunas industrias. En algunos casos, las áreas que han de ser inspeccionadas no son accesibles y las opciones de END son muy limitadas. Entre estos casos se encuentran la inspección bajo soportes o refuerzos y áreas enterradas, principales zonas en las que se localiza la corrosión.

Existen varios métodos de END, actualmente en uso, para este tipo de inspección y todos ellos tienen ventajas e inconvenientes, siendo seleccionados en función de los requisitos y el ambiente de la aplicación.

Las ondas guiadas de baja frecuencia (≈ 50 kHz) y largo alcance (LRUT), son capaces de detectar defectos a distancias muy elevadas (hasta 50-100 m), pero tienen una zona ciega de hasta 3 m, no permiten inspeccionar a altas temperaturas y sus resultados son deficientes ante soportes soldados.

Recientemente se están desarrollando métodos cuantitativos de Tomografía, basados en técnica "Multi-Skip" o en el análisis del tiempo de vuelo de ondas guiadas. Aunque son técnicas prometedoras que permiten una cuantificación estimada de la severidad de los defectos, todavía no han demostrado ser métodos válidos para su uso en condiciones de inspección en campo.

Las ondas guiadas de medio alcance (MRUT) trabajan a mayores frecuencias (0,1 – 1,5 MHz) que las de largo alcance, obteniendo mayores grados de sensibilidad en la detección de defectos. Dichas ondas guiadas

MRUT pueden ser tanto de tipo Lamb como de tipo transversal horizontal (SH), siendo las primeras las que tienen un uso más extendido y que han demostrado ser muy adecuadas para la inspección de tuberías y tanques, incluso en áreas sin acceso como zonas bajo soportes y tuberías parcialmente enterradas. Sin embargo, estas ondas pueden verse afectadas por la presencia de soldaduras en su recorrido.

En el caso de las ondas guiadas transversales horizontales, éstas no presentan conversión de modo y su modo fundamental SH0 no es dispersivo, por lo que no se ven afectadas por la presencia de soldaduras en su trayectoria, demostrando ser una técnica muy adecuada para la inspección de áreas bajo soportes soldados.

2. Comparativa entre ultrasonidos generados por transductores piezoeléctricos y EMAT

El uso de la técnica de ultrasonidos está muy extendido en el mundo de la inspección y su fiabilidad ha sido demostrada. La técnica que más prevalece para la generación de ultrasonidos es el uso de transductores piezoeléctricos que, aunque son altamente eficientes y versátiles, necesitan ser acoplados a la pieza a inspeccionar, bien mediante alta presión obligando a realizar una inspección estática, bien a través de un medio líquido que limita el posicionamiento y la velocidad de trabajo y puede producir interferencias con la propagación de la onda.



EMAT es una técnica de ultrasonidos que genera el sonido en la pieza a inspeccionar en lugar de hacerlo en el propio sensor. Un transductor EMAT induce ondas de ultrasonidos en la pieza deseada con dos campos magnéticos distintos. Un campo de relativamente alta frecuencia (campo RF) generado por bobinas interactúa con un campo estático o de baja frecuencia generado por imanes, creando una fuerza de Lorentz de una manera similar a un motor eléctrico (ver Figura 1).

Esta perturbación produce una onda elástica. De modo inverso, la interacción de ondas elásticas en presencia de un campo magnético induce corrientes en las bobinas receptoras EMAT. En materiales ferromagnéticos la magnetostricción produce fuerzas adicionales que aumentan la señal a niveles muy superiores a los que se conseguirían solamente con el efecto de la fuerza de Lorentz. Numerosos tipos de ondas pueden ser generados utilizando diferentes combinaciones de bobinas e imanes (ver Figura 2).

Debido a que el ultrasonido se genera en la pieza a inspeccionar y no en el transductor, EMAT ofrece las siguientes ventajas respecto a los transductores piezoeléctricos:

- **Inspección en seco.** EMAT no requiere acoplante para la transmisión del sonido, por lo que esta técnica es idónea para la inspección a muy altas y muy bajas temperaturas, así como en la integración en ambientes automatizados
- **Inmune a condiciones superficiales.** EMAT puede inspeccionar a través de recubrimientos y no se ve afectado por contaminantes, óxidos o rugosidad
- **Fácil disposición de los sensores.** La ley de Snell no es aplicable a EMAT. El ángulo del sensor no afecta a la dirección de propagación de la onda, por lo que no es necesario el uso de cuñas
- **Capacidad de generar modos SH.** EMAT es la técnica más práctica y efectiva de generar ondas transversales con polarización horizontal sin necesidad de presión y sin uso de acoplantes de baja densidad que impiden el escaneo de la pieza
- **Selección de modo.** La construcción tipo antena de la bobina EMAT combinada con una excitación

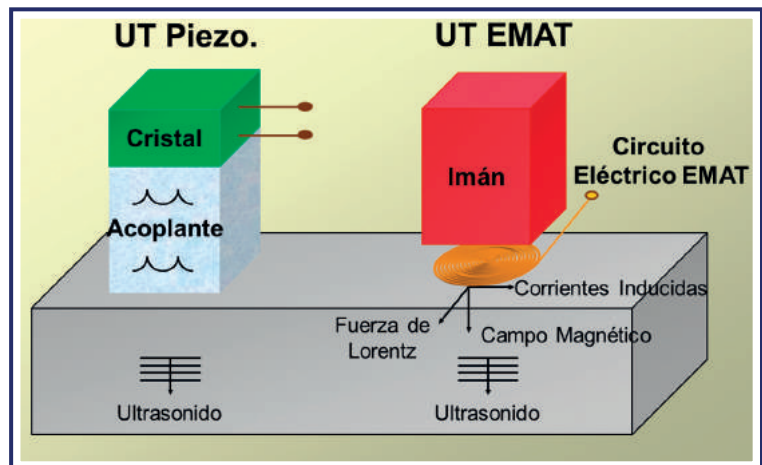


Figura 1. Comparativa entre la técnica convencional de UT y EMAT

multi-ciclo otorga una gran precisión en el dominio de frecuencias, aparte de una selección precisa del modo de onda de interés, lo cual es de gran importancia en la generación de ondas guiadas y su interpretación

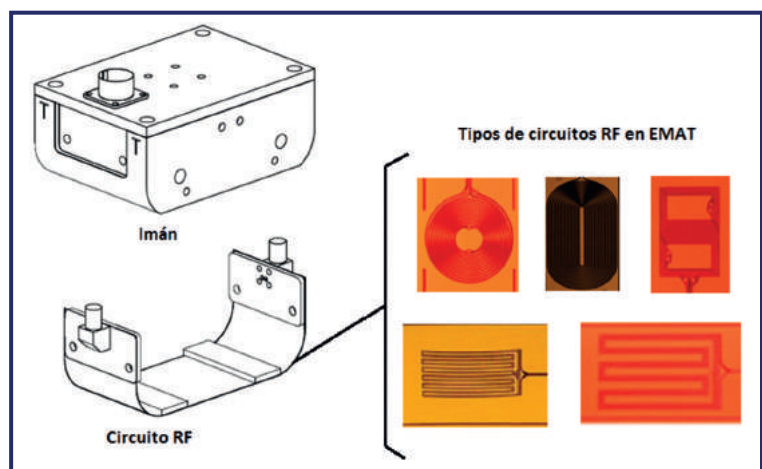


Figura 2. Configuración de imán y circuito RF y diferentes circuitos RF utilizados para generar ultrasonidos EMAT

3. Ondas guiadas de medio alcance (MRUT)

La tecnología EMAT ofrece numerosas opciones de selección de ondas ultrasónicas, entre ellas las ondas guiadas. El rápido desarrollo de los últimos años en este tipo de ondas ha propiciado su uso en diversas aplicaciones que requieren de inspección volumétrica.

A diferencia de las ondas transversales en ángulo, las ondas guiadas se propagan a lo largo de una pieza de forma paralela a su superficie. Los tipos más

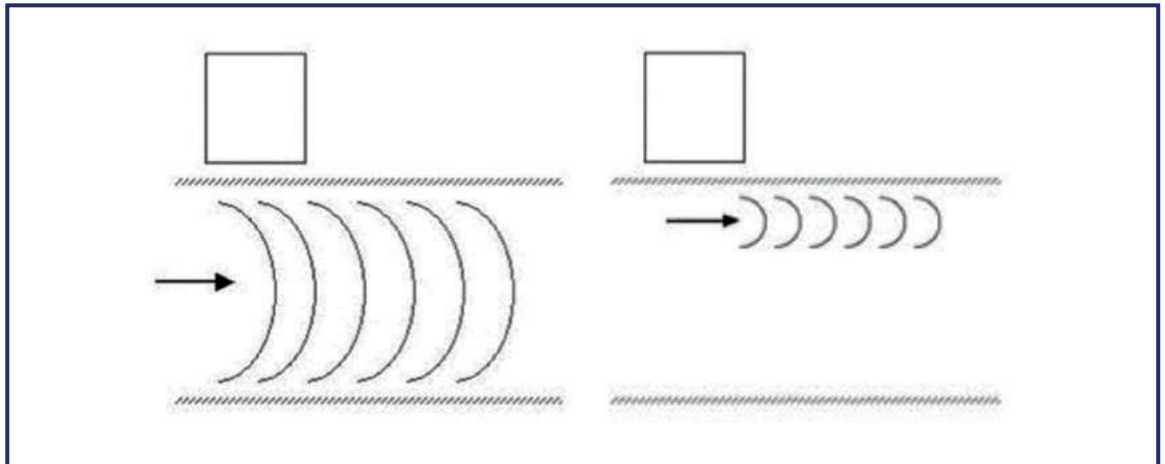


Figura 3. Propagación de ondas guiadas Lamb y SH (izquierda) y ondas Rayleigh (derecha)

habituales de ondas guiadas son de tipo volumétrico (Lamb o SH) que llenan todo el espesor del material, o de tipo superficial (Rayleigh) que siguen el contorno de la pieza inspeccionada (ver Figura 3).

Entre las geometrías que se pueden inspeccionar con ondas guiadas se encuentran barras, tuberías, planchas o raíles, entre otros.

Tanto las ondas de Rayleigh como las de Lamb siguen un patrón elíptico con un movimiento de partícula horizontal y vertical. Sin embargo, mientras que una onda superficial tiene la mayor parte de su energía concentrada en la región más superficial con una profundidad igual a una longitud de onda, los modos Lamb permiten penetrar varias longitudes de onda y llevar a cabo una inspección volumétrica completa del material.

Ambos tipos de onda pueden viajar largas distancias. Sin embargo, debido a su movimiento en el plano vertical,

pueden verse atenuadas por la presencia de líquidos o recubrimientos sobre las fronteras del material sujeto a la inspección. Las ondas de Rayleigh y de Lamb son usadas, frecuentemente, tanto en la inspección de productos durante su fabricación, como en aplicaciones en servicio (ver Figura 4).

Las ondas transversales se componen de partículas cuyo desplazamiento es perpendicular a la dirección de propagación de la onda, con diferente polarización en función de su mecanismo de generación. Los transductores piezoeléctricos se fundamentan en la refracción de la energía longitudinal para generar ondas transversales verticales, las cuales son polarizadas a 90 grados desde el ángulo de entrada. Utilizando acoplante de alta presión o inducción electromagnética (EMAT) es posible la generación de ondas transversales horizontales (SH) que viajan, paralelamente, a la superficie de entrada. Como ondas guiadas, los modos SH son la mejor opción para la inspección de

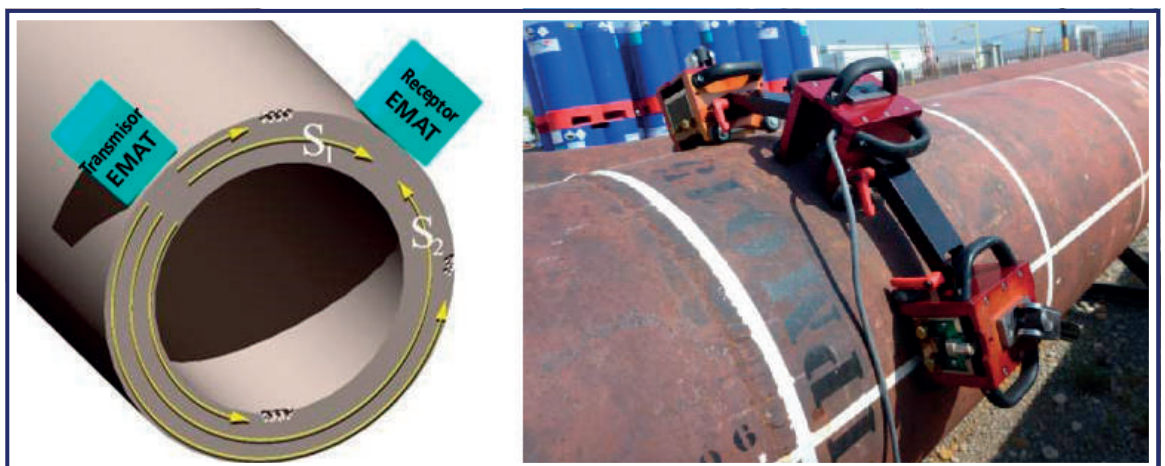


Figura 4. Esquema de configuración axial e inspección de tubería con ondas guiadas MRUT



tuberías y otras estructuras donde la presencia de soldaduras, los líquidos, abrazaderas o recubrimientos podrían atenuar otros modos de ondas ultrasónicas.

4. Aplicaciones de las ondas guiadas de medio alcance (MRUT)

Los diferentes tipos de ondas guiadas de medio alcance se aplican, actualmente, a las siguientes inspecciones en servicio:

4.1. Inspección de tuberías y tanques

La inspección de tuberías y tanques en servicio es una de las principales aplicaciones de las ondas guiadas de medio alcance. Innerspec Technologies ha desarrollado un escáner MRUT con tecnología EMAT que permite evaluar el estado de las conducciones y depósitos a alta velocidad, detectando la presencia de corrosión y otras discontinuidades (ver Figura 5).

Las alternativas tradicionales para la inspección de tuberías en servicio con ultrasonidos incluyen:

- Equipos de Ondas guiadas de largo alcance (LRUT). Se colocan anillos con transductores en diferentes secciones accesibles de la tubería y se inspeccionan largas distancias (hasta 50-100 metros) desde cada posición. Permiten una evaluación cualitativa del estado de un tramo de tubería
- Equipos "Phased Array". Permiten una cuantificación de los defectos y su principal inconveniente es la reducida velocidad de inspección

Aunque ambas técnicas tienen aplicaciones específicas, es habitual su uso combinado para optimizar costes, realizando una evaluación preliminar con LRUT y, posteriormente, con "Phased Array" sobre zonas marcadas en la primera evaluación.

El campo de aplicación de las ondas guiadas de medio alcance (MRUT) comprende la evaluación cualitativa de la tubería realizando un rápido escaneo a lo largo

de la misma y utilizando, posteriormente, una técnica cuantitativa sobre las zonas determinadas como potencialmente defectuosas.



Figura 5. Inspección de tubería en servicio con escáner de ondas guiadas MRUT

En la inspección de tuberías y tanques, el escáner MRUT se puede configurar para trabajar con un solo sensor actuando como transmisor y receptor o con dos sensores separados (ver Figura 6).

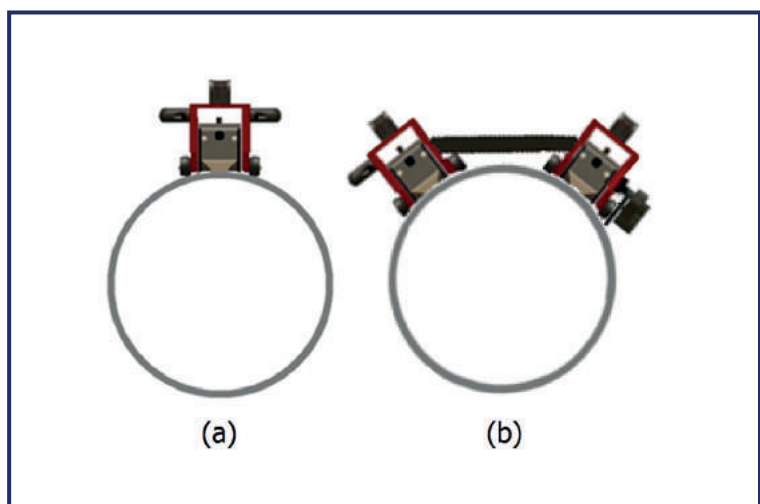


Figura 6. Configuraciones posibles del escáner MRUT para inspección axial de tubería. (a) 1 sensor, (b) 2 sensores

En ambos casos, es posible seleccionar la técnica más adecuada para las necesidades específicas de cada inspección, ya sea detección de reflexiones o medición de atenuaciones.



Los principales beneficios de la técnica MRUT son:

- Mayor sensibilidad de detección y capacidad de localización de defectos respecto a la técnica de ondas de largo alcance
- Alta velocidad de inspección
- No es necesario el uso de gel acoplante
- Posibilidad de inspeccionar a alta temperatura (200 °C)
- Se puede aplicar sobre tuberías pintadas y con alta rugosidad superficial

La técnica MRUT ha sido progresivamente adoptada por las principales empresas de inspección a nivel mundial y demandada por las principales petroleras, como British Petroleum, Royal Dutch Shell, Exxon Mobil, Aramco, ConocoPhillips, Chevron, PEMEX, PDVSA, etc.

4.2. Inspección bajo soportes apoyados y zonas inaccesibles

Encontrar un método fiable de END para la detección de corrosión bajo soportes, sin tener que retirarlos, es uno de los principales retos en el mundo de la inspección en servicio.

El escáner MRUT está siendo utilizado para la inspección bajo soportes apoyados y otras zonas inaccesibles, como tuberías semienterradas y pasamuros, así como para la inspección del primer tramo de una tubería



Figura 7. Configuración del escáner MRUT para inspección circunferencial de tubería

enterrada (detectando defectos a profundidades de hasta 1 metro).

La técnica de inspección más utilizada en estos casos es la de pulso-eco, midiendo la amplitud de reflexiones provenientes de discontinuidades (ver Figura 7).

En las situaciones con acceso a los dos lados del soporte, simplemente apoyado, puede ser también posible utilizar la técnica de atenuación situando el transmisor y el receptor a cada lado del mismo.

4.3. Inspección bajo soportes soldados

Tal y como se explicó en puntos anteriores, una de las diferencias principales entre las ondas guiadas Lamb y SH es el movimiento de la partícula en el material. Mientras que el movimiento de las ondas de Lamb tiene una componente vertical y otra horizontal, las ondas SH únicamente se desplazan en el plano horizontal, por lo que se ven menos afectadas ante factores externos como líquidos, recubrimientos o soportes.

Debido a que los soportes simplemente apoyados no producen una gran atenuación de la señal, es posible la inspección bajo los mismos con ondas guiadas Lamb. Sin embargo, a la hora de trabajar con soportes soldados o camisas de refuerzo, la naturaleza de la soldadura impide hacer uso de este tipo de ondas guiadas, ya que provoca una pérdida considerable de señal.

Para este tipo de soportes o refuerzos las ondas guiadas SH se presentan como la solución más adecuada, ya que no se ven afectadas por la soldadura. Para demostrar esta teoría, se realizaron pruebas con sensores SH con imanes permanentes sobre tuberías con refuerzos soldados bajo los cuales existían distintos niveles conocidos de corrosión. La inspección se realizó con sensores SH con imanes permanentes haciendo uso de una configuración transmisión-recepción, posicionando los sensores a ambos lados de los parches. En dicha configuración el transmisor induce las ondas guiadas transversales horizontales a un lado del refuerzo y el receptor situado al otro lado del mismo recoge la cantidad de energía ultrasónica que llega desde el emisor después de atravesar la zona bajo el refuerzo (ver Figura 8).

Para comprobar que la soldadura no provocaba una pérdida de señal, se midió la amplitud de la señal





Figura 8. Sensores SH con imanes permanentes posicionados a ambos lados de un refuerzo

recibida en una zona limpia sin refuerzos y en una zona limpia con un parche soldado utilizando los mismos parámetros de inspección ultrasónica. Los resultados fueron satisfactorios, ya que la amplitud en ambos casos era muy similar, por lo que se comprobó que la soldadura no tenía efectos sobre la propagación de las ondas guiadas transversales horizontales.

A la vista de estos resultados, se procedió a analizar el resto de las zonas. Los sensores fueron situados en diferentes puntos a ambos lados de los refuerzos para inspeccionar el área bajo los mismos. En cada uno de estos puntos se registró un nivel determinado de atenuación de la señal (ver Figura 9), obteniendo una estimación de la pérdida de espesor (ver Figura 10).

Una vez realizado el estudio del estado de todas las áreas bajo los refuerzos, se procedió a comparar los resultados obtenidos con los datos reales adquiridos antes de añadir los refuerzos, verificando la existencia

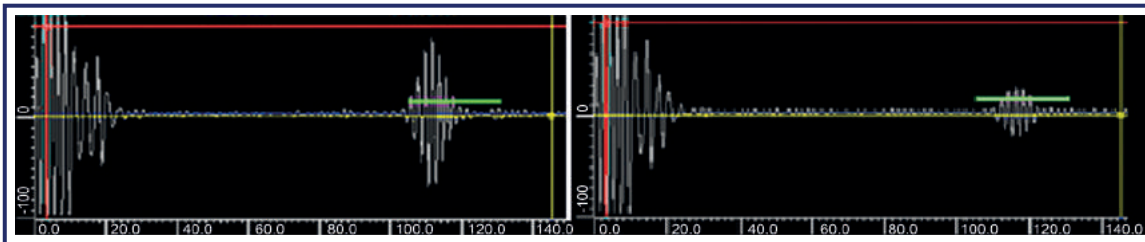


Figura 9. Imagen de osciloscopio con un área libre de defectos (izquierda) y con una zona defectuosa en la trayectoria de las ondas guiadas transversales horizontales (derecha)

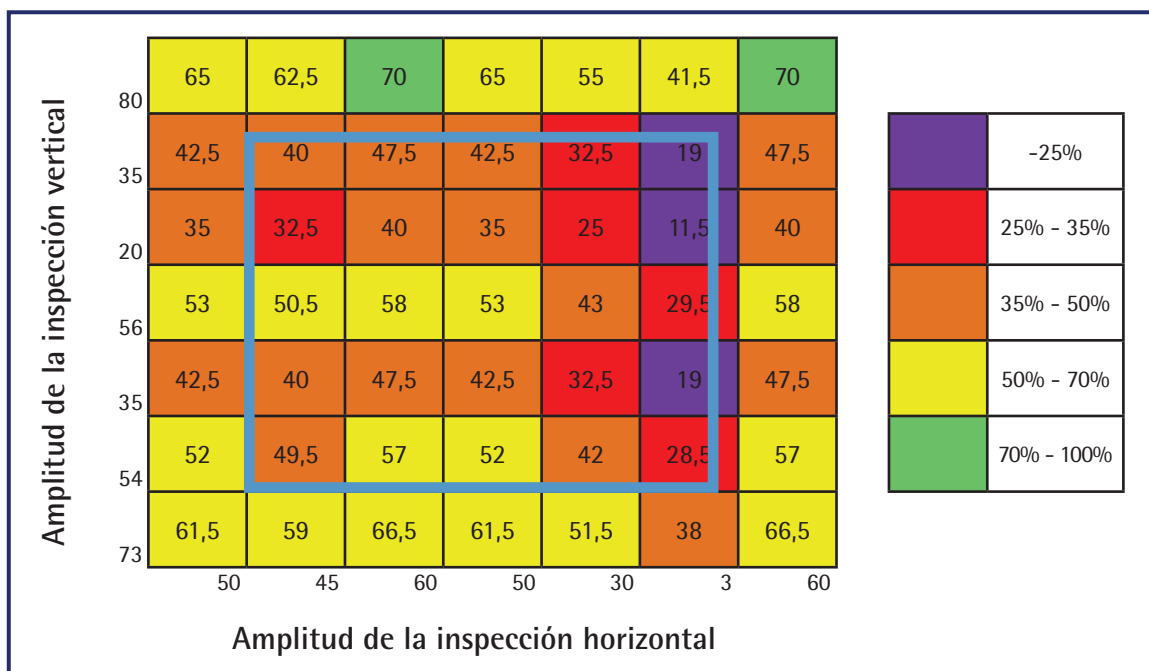


Figura 10. Estimación de severidad de daño bajo uno de los refuerzos



de una elevada correlación entre ambos. Por lo tanto, los beneficios y limitaciones del uso de sensores SH con imanes permanentes se presentan a continuación:

Beneficios:

- Se ven menos afectadas ante factores externos que las ondas guiadas Lamb
- No generan conversión de modo
- Capaces de inspeccionar aceros inoxidables austeníticos

Limitaciones:

- Muy sensibles al posicionamiento de los sensores
- Elevada sensibilidad a la distancia entre transductor y la pieza (lift-off)

5. Nuevos sensores magnetostrictivos

Tras los resultados obtenidos haciendo uso de las ondas guiadas SH mediante sensores con imanes permanentes para la inspección bajo soportes, se evidencia que este tipo de ondas ultrasónicas suponen la mejor opción para trabajar en condiciones donde existen factores externos que imposibilitan el trabajo con ondas guiadas Lamb, si bien es cierto que los sensores SH con imanes permanentes requieren de unas condiciones de trabajo en campo que, en ocasiones, son difíciles de lograr.

En esta línea de trabajo, se han desarrollado nuevos sensores magnetostrictivos que también hacen uso de las ondas guiadas MRUT SH (ver Figura 11). Estos sensores han sido especialmente diseñados para la inspección bajo soportes o en zonas inaccesibles y suponen un gran avance en la técnica con ondas guiadas. La diferencia principal respecto a la técnica utilizada con los sensores SH con imanes permanentes es el mecanismo de generación de ultrasonido, que en este caso se realiza mediante magnetostricción, mientras que los sensores con imanes permanentes utilizan una combinación de magnetostricción y Lorentz.

Este mecanismo genera las ondas ultrasónicas de una manera mucho más efectiva, obteniendo una mayor resolución y sensibilidad. Para potenciar la magnetostricción es necesario utilizar una cinta de material magnetostrictivo que ha de ser fijada a la pieza



Figura 11. Sensor magnetostrictivo y escaneo circunferencial

a inspeccionar, por la cual el sensor será desplazado utilizando una configuración pulso-eco. Esta fijación a la pieza a inspeccionar conlleva una mínima preparación superficial, siendo sólo necesario eliminar la cascarilla superficial del material, pudiendo adherirse la cinta en piezas pintadas (ver Figura 12).



Figura 12. Inspección circunferencial con nuevo sensor magnetostrictivo

El nuevo diseño de estos sensores incluye la posibilidad de disparar las ondas en un sentido concreto, evitando así reflexiones del lado opuesto que podrían suponer interpretaciones erróneas en cierto tipo de inspecciones.

Para lograr una mayor detección, es posible implementar un algoritmo SAFT que procesa los datos obtenidos y mejora sustancialmente la resolución, visualizando con más claridad las zonas con discontinuidades (ver Figura 14).

Además, se ha diseñado un "software" específico para esta aplicación que puede ser instalado en los equipos portátiles de inspección Innerspec PowerBox H,



haciendo de este sistema una herramienta aún más completa (ver Figura 13).

Beneficios de los nuevos sensores magnetostrictivos:

- Diseñados especialmente para inspección bajo soportes y zonas inaccesibles
- Mayor resolución y sensibilidad que los sensores SH con imanes permanentes
- Posibilidad de disparo en un sentido
- Software de procesamiento de datos SAFT para mayor resolución
- Software específico para equipos portátiles de Innerspec Technologies

Limitaciones:

- El proceso de corte y fijación de la cinta magnetostrictiva ha de realizarse con precisión
- La superficie de adhesión en la pieza ha de ser homogénea

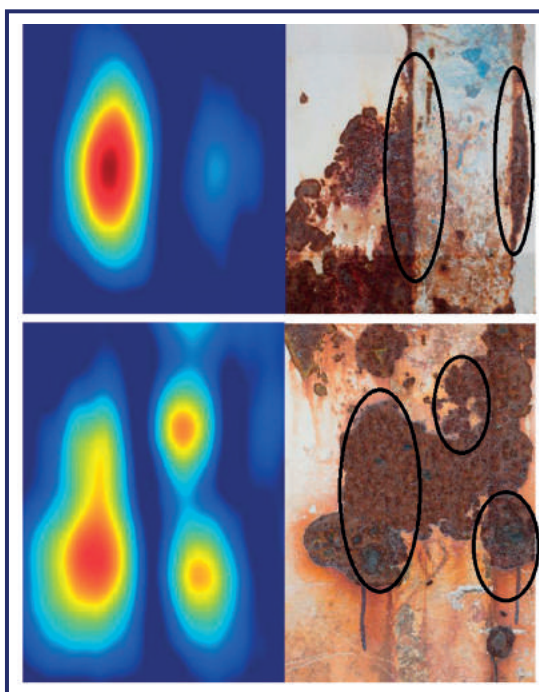


Figura 13. Zonas defectuosas bajo soportes y B-Scan de las mismas obtenidos con el nuevo sensor magnetostrictivo

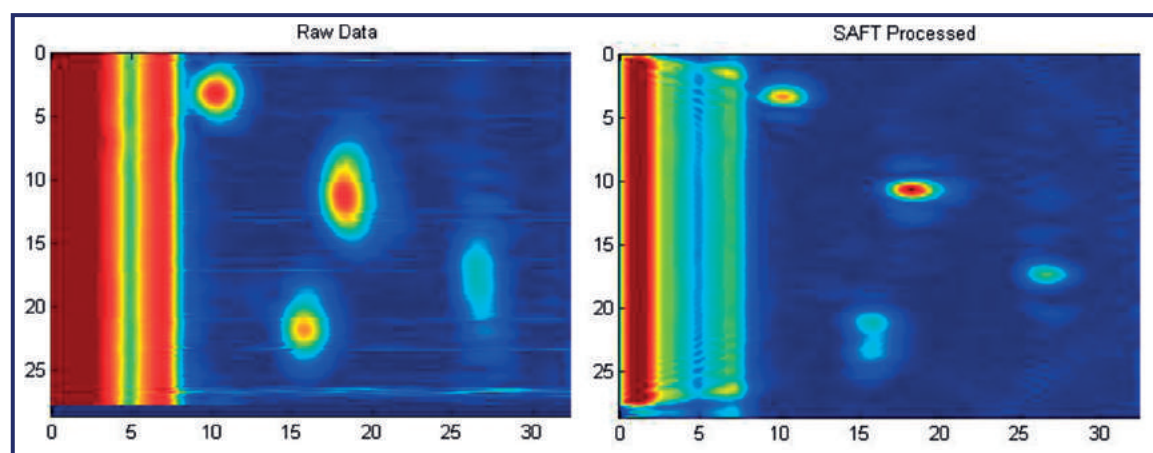


Figura 14. B-Scan de datos sin procesar y procesados mediante algoritmo SAFT

6. Conclusiones

Las ondas guiadas de medio alcance generadas por EMAT están creciendo en popularidad gracias a las ventajas técnicas y económicas que ofrecen para la rápida evaluación del estado de tuberías y tanques, así como para la inspección bajo soportes y en otras zonas inaccesibles.

Las ondas guiadas transversales horizontales generadas por EMAT son la mejor opción para la inspección bajo soportes y refuerzos soldados por estar menos afectadas por factores externos, como la presencia de soldaduras.

Innerspec Technologies ha desarrollado un nuevo sensor magnetostrictivo que aprovecha al máximo las ventajas ofrecidas por las ondas guiadas SH y solventa las limitaciones observadas en los sensores SH con imanes permanentes.

La combinación del nuevo sensor magnetostrictivo para inspección bajo soportes y de zonas inaccesibles junto con el escáner MRUT para la evaluación de tuberías y tanques, conforma la solución de inspección con ondas guiadas de medio alcance más completa en el mercado actual.