

Análisis de Integridad por Corrosión en Ductos mediante avanzadas técnicas END

Fabrizio Russo (fabrizio.russo@besna.com.ar), Sebastian Sanchez De Paulis (sebastian.sanchez@besna.com.ar), Leandro Iglesias Raggio (leandro.raggio@besna.com.ar), José Brizuela (jose.brizuela@besna.com.ar), Besna MyT SA.

SINOPSIS

El Análisis de Integridad por Corrosión en Ductos es un proceso fundamental en la industria del transporte de hidrocarburos, químicos y otros fluidos. El objetivo es garantizar la seguridad, confiabilidad y eficiencia operativa de los ductos, minimizando riesgos de fallas, fugas o incidentes ambientales. El análisis principalmente se basa en la evaluación, monitoreo y mantenimiento del sistema de tuberías. Para ello, se emplean diversas metodologías, entre las más destacadas se encuentran:

1. Inspección en línea (ILI, Inline Inspection): abarcan herramientas inteligentes, como los robots instrumentados (pigs), para detectar corrosión, grietas, deformaciones u otras anomalías en el ducto.
2. Evaluación de riesgo: Se identifican amenazas potenciales, como corrosión externa e interna, daños mecánicos o fenómenos geológicos, para priorizar acciones preventivas.
3. Monitoreo y mantenimiento predictivo: Sensores y sistemas de detección temprana permiten identificar cambios en la integridad estructural del ducto y optimizar los planes de mantenimiento.
4. Pruebas de presión e inspección visual: Complementan la evaluación de la resistencia y hermeticidad del ducto.

El análisis de integridad permite prolongar la vida útil de los ductos, cumplir con regulaciones y normativas de seguridad, y reducir costos asociados a fallas. Su implementación efectiva mejora la sostenibilidad y confiabilidad de la infraestructura.

Este trabajo presenta la aplicación e integración de dos tecnologías avanzadas de inspección desarrolladas, implementadas dentro de una plataforma tecnológica propia, orientadas a la caracterización cuantitativa de pérdida de espesor por corrosión con el mayor nivel de detalle posible, con el objetivo de fortalecer los análisis de integridad estructural:

1. “Total Focusing Method (TFM)”, descripción y aplicación de la avanzada técnica de ultrasonido utilizada para realizar el mapeo de la corrosión mediante la captura de imágenes de alta resolución que facilitan la evaluación.
2. Radiografía digital, se presenta el desarrollo y uso de nuevas herramientas basadas en el uso de arreglos de detectores digitales (DDA) de tecnología flexible que evitan las aberraciones geométricas en las imágenes y ofrecen claras ventajas para el análisis de defectos por corrosión.

INTRODUCCIÓN

La integridad estructural de los ductos constituye un aspecto crítico en la industria del transporte de hidrocarburos, productos químicos y otros fluidos, debido a su impacto directo en la seguridad operativa, la continuidad del servicio y la protección del medio ambiente. Entre los diversos mecanismos de degradación que afectan a estos sistemas, la corrosión, tanto interna como externa, representa una de las principales causas de pérdida de espesor, reducción de la resistencia mecánica y, en casos extremos, fallas catastróficas.

En este contexto, los Ensayos No Destructivos (END) desempeñan un rol fundamental en los programas de inspección y mantenimiento, permitiendo la detección y caracterización de defectos sin comprometer la integridad del componente evaluado. Sin embargo, más allá de la simple detección de anomalías, uno de los mayores desafíos técnicos actuales radica en la cuantificación precisa de la pérdida de espesor, ya que los resultados obtenidos a partir de distintas técnicas de END son utilizados como datos de entrada en los modelos de evaluación de integridad estructural, tales como ASME B31G, DNV RP-F101 o API 579, influyendo directamente en la estimación de la presión admisible y en la toma de decisiones operativas.

Tradicionalmente, técnicas como el ultrasonido convencional y la radiografía industrial han sido ampliamente empleadas para la inspección de corrosión. En los últimos años, el desarrollo de tecnologías más avanzadas, como el Ultrasonido por Arreglos de Fases (Phased Array) y la Radiografía Digital, ha permitido mejorar la calidad de la información obtenida, incrementando la resolución, la repetibilidad y la capacidad de procesamiento de datos. En particular, el Total Focusing Method (TFM), basado en la adquisición Full Matrix Capture (FMC), representa una evolución significativa dentro de las técnicas ultrasónicas, al permitir la reconstrucción de imágenes de alta resolución mediante el enfoque dinámico de todos los elementos del arreglo, lo que resulta especialmente atractivo para la caracterización detallada de defectos complejos como la corrosión localizada [1]. A diferencia del Phased Array convencional, TFM ofrece una mayor capacidad de resolución espacial y una mejor definición del perfil real del defecto, aunque su aplicación industrial aún se encuentra en proceso de adopción y estandarización.

Por otro lado, la radiografía digital, a través del uso de detectores de arreglos digitales (DDA), ofrece ventajas sustanciales frente a la radiografía convencional con película, tales como la eliminación de procesos químicos, la posibilidad de procesamiento digital de imágenes y una mayor flexibilidad geométrica. En particular, el uso de detectores digitales flexibles permite adaptarse a la curvatura del ducto, reduciendo las aberraciones geométricas asociadas a la proyección radiográfica en superficies cilíndricas, lo que mejora la calidad de la imagen y la interpretación de defectos por pérdida de espesor. No obstante, para garantizar la confiabilidad de las mediciones cuantitativas, es necesario que el detector mantenga una geometría estable y una calibración adecuada de la ganancia en función de la distancia fuente–detector, lo cual requiere la implementación de dispositivos de fijación o bloqueo del panel tanto durante la calibración como durante la adquisición de imágenes, con el fin de asegurar la estabilidad geométrica del sistema y la correcta relación entre ganancia, distancia y niveles de gris registrados. A pesar de estas ventajas, la estimación cuantitativa de espesores a partir de imágenes radiográficas continúa siendo una tarea limitada, dado que la mayoría de los softwares disponibles se orientan principalmente a la detección cualitativa de defectos y no a la medición directa de pérdida de material.

En este marco, el presente trabajo tiene como objetivo principal evaluar experimentalmente y comparar la capacidad del Total Focusing Method y de la radiografía digital para la caracterización cuantitativa de defectos por corrosión localizada en ductos, analizando la incertidumbre asociada a cada técnica en la medición de pérdida de espesor. Asimismo, se propone una metodología de calibración radiográfica basada en la correlación entre niveles de gris y espesores reales, mediante el uso de patrones escalonados del mismo material, con el fin de mejorar la estimación cuantitativa de espesores a partir de imágenes digitales.

A partir de esta metodología, se busca comparar los resultados obtenidos con ambas técnicas frente a patrones de referencia y probetas reales con corrosión, evaluando su precisión, repetibilidad e incertidumbre, y analizando el impacto de dichas mediciones en los estudios de integridad estructural y en la toma de decisiones operativas.

En este contexto, la integración de múltiples tecnologías de inspección avanzadas dentro de una misma plataforma tecnológica constituye un diferencial estratégico, permitiendo seleccionar el principio físico más adecuado para cada escenario operativo y reducir la incertidumbre asociada a la caracterización de defectos críticos.

1. TOTAL FOCUSING METHOD (TFM) APLICADO A INSPECCIONES DE CORROSIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA

La evaluación de pérdida de espesor por corrosión mediante ultrasonido convencional se ha basado históricamente en mediciones puntuales de espesor utilizando transductores monoelemento de incidencia normal. En este método, el espesor remanente se determina a partir del tiempo de vuelo del eco de fondo, asumiendo una velocidad de propagación constante en el material inspeccionado.

Con el objetivo de obtener una representación espacial más completa de áreas afectadas por corrosión, se incorporó posteriormente la técnica de C-scan, la cual permite generar mapas bidimensionales de espesor mediante el registro sistemático de mediciones en una malla definida sobre la superficie del componente. En este procedimiento, el transductor se desplaza manualmente o mediante sistemas mecanizados, registrando el espesor en cada punto de la grilla y construyendo una imagen (Figura 1).

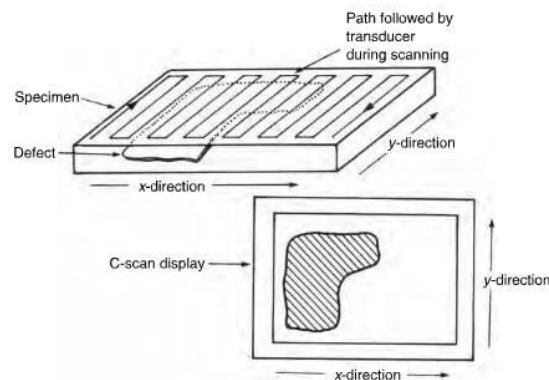


Figura 1: Conformación de C-scan en Ultrasonido convencional.

La principal desventaja que tiene esta técnica convencional es la productividad, requiriendo de mucho tiempo para cada inspección. A su vez al utilizar un transductor monoelemento se tiene una resolución lateral limitada por el diámetro del haz y se tiene sensibilidad reducida para geometrías irregulares.

Estas limitaciones impulsaron el desarrollo e implementación de técnicas basadas en arreglos de fases (Phased Array), las cuales permiten mejorar significativamente la cobertura de inspección, la resolución espacial y la capacidad de caracterización geométrica respecto al ultrasonido convencional. Diversos trabajos han abordado la mejora de la resolución espacial en inspecciones mediante arreglos de fases, incluyendo estrategias orientadas a optimizar la focalización y mejorar la resolución en elevación, lo que permite una caracterización más precisa de la geometría de discontinuidades [2].

En los sistemas Phased Array, el transductor está compuesto por múltiples elementos piezoeléctricos que pueden ser excitados individualmente mediante señales eléctricas controladas por leyes de retardo específicas. La aplicación de estas leyes permite conformar y direccionar el frente de onda ultrasónico dentro del material inspeccionado [3].

Cuando todos los elementos son excitados simultáneamente, se genera un frente de onda plano (Figura 2a). En cambio, si los elementos son activados con retardos progresivos, se produce un frente de onda inclinado (Figura 2b), permitiendo orientar el haz ultrasónico a un ángulo determinado.

En aplicaciones de inspección por corrosión, habitualmente se emplean arreglos lineales con zapatas de incidencia normal para la generación de ondas longitudinales. En este contexto, se utiliza un frente de onda plano, ya que el objetivo principal es la medición de espesor remanente y la detección de pérdida de material en dirección perpendicular a la superficie.

Durante la etapa de recepción, los ecos ultrasónicos reflejados son captados por todos los elementos del arreglo de manera simultánea, lo que permite mejorar la relación señal-ruido y optimizar la detección del eco de fondo.

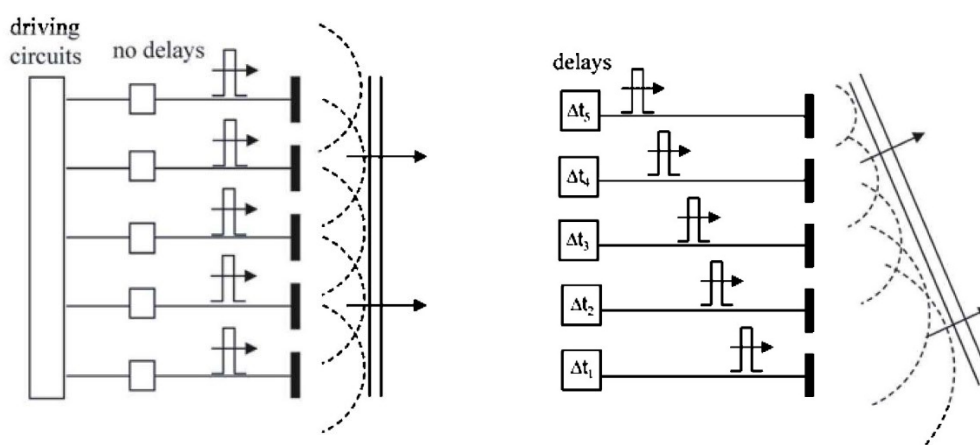


Figura 2a. Conformación de frente de ondas plano sin retardos. **Figura 2b.** Conformación de frente de ondas plano con inclinación del haz ultrasónico a raíz de la ley de retardo de las señales eléctricas. [1]

A diferencia del Phased Array convencional, el Total Focusing Method (TFM) utiliza los mismos transductores multielemento, pero comandados bajo una estrategia de adquisición diferente. Durante cada pulso se excita únicamente un elemento del arreglo, generando una emisión ultrasónica que se propaga hacia el reflector (Figura 3, arriba). Posteriormente, la señal reflejada es recibida por todos los elementos activos del transductor (Figura 3, debajo). Este procedimiento se repite secuencialmente para cada elemento emisor.

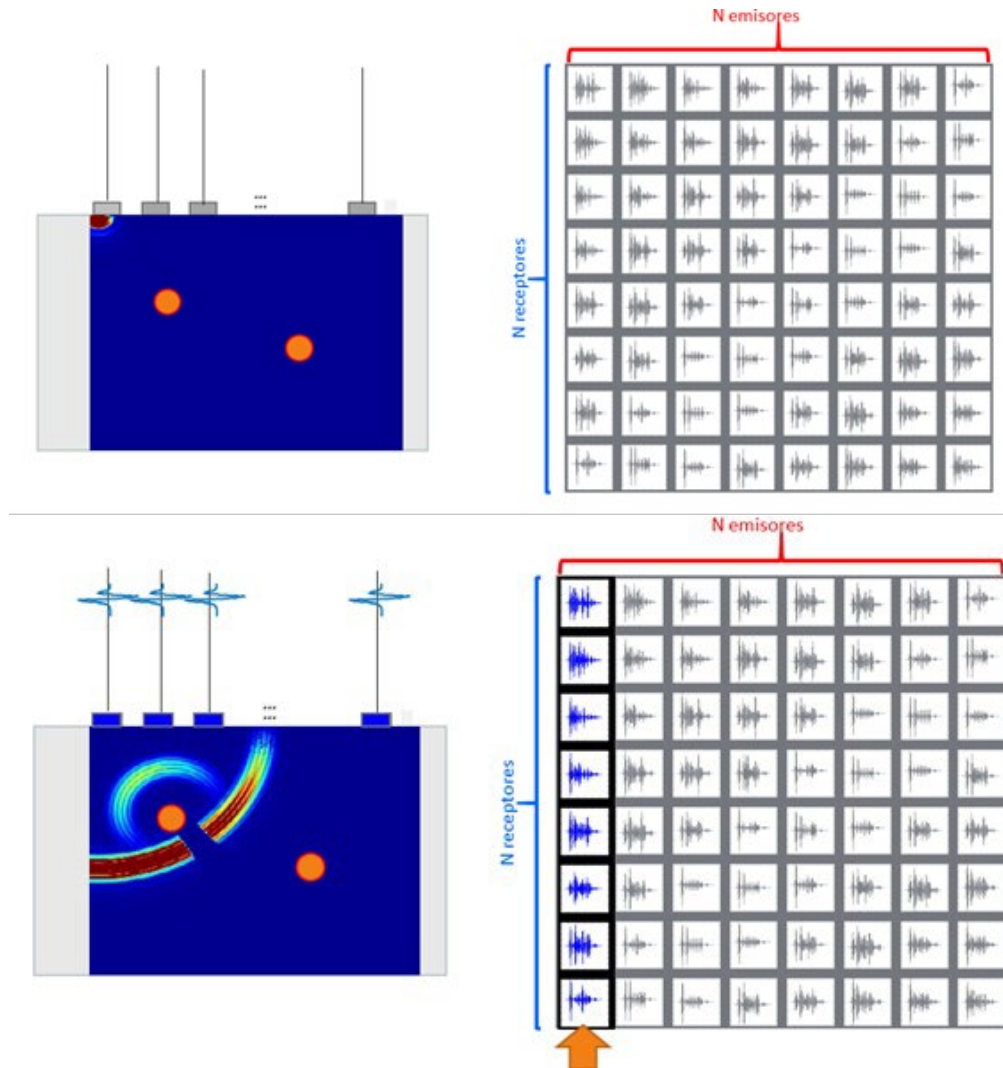


Figura 3: Adquisición de datos FMC.

Previamente, se define una zona de interés (ROI – *región of interest*) dentro de la cual se adquirirán los datos mediante el procedimiento Full Matrix Capture (FMC). El FMC consiste en registrar todos los A-scan (series temporales de amplitud en función del tiempo) correspondientes a cada combinación posible de elementos emisores y receptores del arreglo. De esta manera, se obtiene una matriz completa de señales que contiene la totalidad de la información acústica capturada durante la inspección. Para construir este conjunto de datos utilizando la apertura completa del transductor, el número total de adquisiciones necesarias es igual al cuadrado del número de elementos que componen el arreglo (Figura 4).

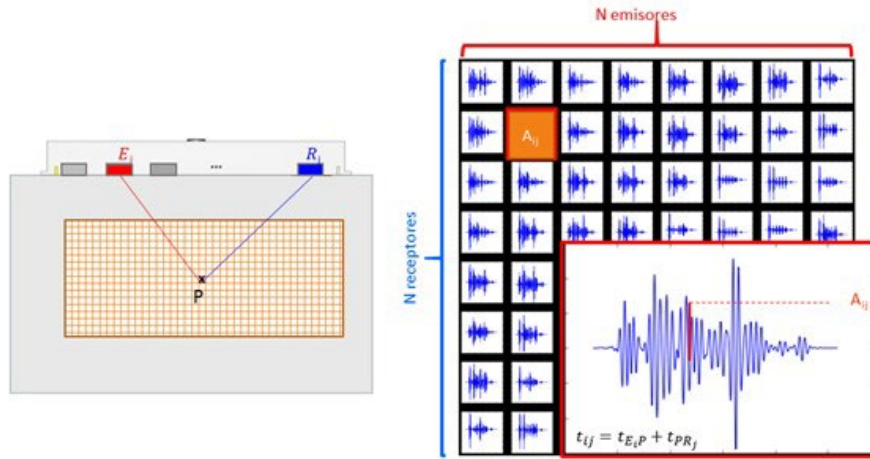


Figura 4: Adquisición de datos FMC para un punto P en la zona de interés (ROI).

Una de las principales ventajas del TFM es que el enfoque se realiza digitalmente en cada punto de la ROI, a diferencia del Phased Array convencional, donde la focalización es óptima solo en una profundidad determinada. En TFM, la formación sintética del haz se aplica tanto en emisión como en la recepción mediante el procesamiento de todas las combinaciones de A-scan adquiridas por FMC, esto hace posible lograr un enfoque en todos los puntos de la región de interés, lo que fundamenta la denominación de Método de Enfoque Total. A consecuencia de esto se logran imágenes ultrasónicas más definidas y que sean más sencillas de interpretar por parte del operador.

1.2 CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL Y EQUIPAMIENTO

La implementación del TFM en inspecciones de corrosión impone exigencias técnicas superiores a las del Phased Array convencional, principalmente debido al elevado volumen de datos generado mediante la adquisición FMC y al procesamiento intensivo requerido para la reconstrucción de la imagen.

En primer lugar, el equipo debe contar con alta capacidad de procesamiento en tiempo real, ya que el conjunto de datos FMC implica un número de adquisiciones igual al cuadrado del número de elementos del transductor. La reconstrucción TFM requiere aplicar algoritmos de formación sintética de haz para cada punto de la región de interés, lo que demanda procesadores de alto rendimiento (CPU y/o GPU dedicadas) capaces de mantener velocidades de actualización compatibles con la inspección industrial. El desarrollo de técnicas avanzadas de formación de imagen, tales como configuraciones de arreglo virtual y estrategias de onda plana (PWI - Plane Wave Imaging), ha permitido optimizar la eficiencia computacional y la calidad de reconstrucción en aplicaciones industriales [4].

Asimismo, es fundamental disponer de gran capacidad de almacenamiento y ancho de banda interno, dado que los datos FMC contienen todos los A-scan correspondientes a cada combinación emisor-receptor. En aplicaciones de mapeo de corrosión, donde se realizan adquisiciones continuas durante el escaneo, el volumen de datos puede incrementarse considerablemente.

El sistema debe permitir la utilización de arreglos lineales con un elevado número de elementos y control completamente individual de cada canal, asegurando el acceso a la apertura total del transductor para maximizar la resolución lateral y la capacidad de focalización sintética. Asimismo, es necesario contar con una alta frecuencia de muestreo y una elevada tasa de repetición de pulsos (PRF), lo que posibilita realizar adquisiciones FMC en tiempos reducidos, favoreciendo la productividad durante el escaneo. Paralelamente, una adecuada relación señal–ruido resulta fundamental, ya que la calidad de la reconstrucción TFM depende directamente de la fidelidad y estabilidad de los A-scan adquiridos. En aplicaciones específicas de corrosión, el equipo debe ofrecer:

- Capacidad de definir regiones de interés (ROI) ajustadas al espesor inspeccionado.
- Posibilidad de aplicar distintos modos de reconstrucción (por ejemplo, propagación longitudinal directa).
- Herramientas de mapeo y codificación por colores para representación de pérdida de espesor.
- Integración con sistemas de escaneo mecanizado o encoders para generar mapas C-scan con datos TFM.

Finalmente, la estabilidad electrónica, la sincronización precisa entre canales y la calibración adecuada del sistema son aspectos críticos, ya que pequeñas desviaciones temporales pueden afectar la precisión del enfoque total y, por consiguiente, la determinación del espesor remanente.

En el presente trabajo se emplearon dos configuraciones de inspección diferenciadas, seleccionadas en función de las condiciones operativas y los objetivos específicos de cada ensayo.

Se realizó una inspección en laboratorio mediante técnica de inmersión en cuba (Figura 5), empleando un equipo con gran capacidad de adquisición FMC (TPAC Explorer 64:128TFM) y un transductor lineal de alta frecuencia nominal de 15 MHz de 128 elementos interespaciados a 0,21mm. El sensor fue diseñado y desarrollado por Besna para optimizar y maximizar la resolución lateral y la capacidad de focalización sintética en aplicaciones de corrosión localizada. Esta configuración permite trabajar bajo condiciones controladas de acoplamiento acústico y con mayor resolución espacial, favoreciendo la caracterización detallada de la morfología de los defectos asociados a pérdida de material por corrosión.

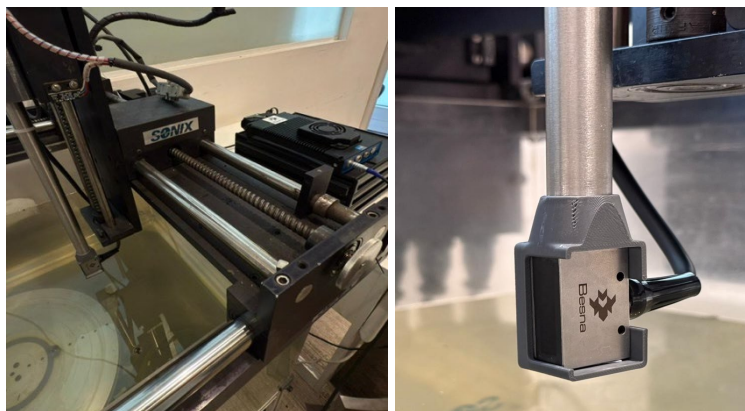


Figura 5: Sistema de inmersión con equipo de PAUT y transductor de 15MHz.

Por otro lado, para las inspecciones en condiciones similares al campo se utilizó un equipo portátil de ultrasonido Phased Array con capacidad de adquisición FMC y reconstrucción TFM en tiempo real (Cypher – Eddify 64:128), combinado con un transductor tipo *wheel array* especialmente diseñado y optimizado para aplicaciones de mapeo de corrosión en campo (Figura 6). El dispositivo integra un array lineal de 10 MHz, 128 elementos, con un sistema con acoplamiento por columna de agua contenida en una rueda flexible, lo que permite realizar barridos continuos sobre la superficie del componente, optimizando la estabilidad del acoplamiento y la velocidad de adquisición durante el mapeo de espesores.



Figura 6: Inspección con equipo portátil de PAUT y transductor “Wheel array” de 10 MHz.

1.3 VALIDACIÓN Y DESARROLLO EXPERIMENTAL

Con el objetivo de evaluar el desempeño del Total Focusing Method (TFM) en aplicaciones de caracterización de pérdida de material por corrosión, se desarrolló un programa compuesto por tres etapas progresivas, orientadas a validar la capacidad de detección, dimensionamiento y representación geométrica de discontinuidades.

En una primera etapa, se realizó el escaneo de una pieza patrón consistente en una placa del mismo material base que las muestras posteriores, mecanizada con agujeros de fondo plano (Flat Bottom Holes, FBH) de distintos diámetros y profundidades (Figura 7). El ensayo se llevó a cabo en laboratorio dentro de un sistema automatizado para inmersión, utilizando un transductor lineal de alta frecuencia (15 MHz) y un sistema de adquisición con arquitectura de procesamiento y configuración de reconstrucción TFM desarrollada e integrada por Besna, incluyendo la optimización de algoritmos de focalización sintética y gestión de alto volumen de datos FMC.

El sistema empleado permitió no solo la reconstrucción bidimensional convencional, sino también el procesamiento volumétrico de los datos adquiridos, posibilitando la generación de representaciones tridimensionales (3D) a partir de la matriz completa de señales registradas. Esta capacidad de post-procesamiento facilitó el análisis detallado de la geometría de los reflectores artificiales y la evaluación de la precisión en la determinación de profundidades.



Figura 7: Patrón de referencia “Flat Bottom Holes” (FBH) con agujeros de 6 mm de diámetro mecanizados con electroerosión.

La utilización de un transductor de alta frecuencia en configuración de inmersión permitió trabajar bajo condiciones de acoplamiento acústico controladas, reduciendo variabilidades asociadas al contacto directo. Asimismo, la mayor frecuencia favoreció una mejor resolución axial y lateral, generando un eco de interfaz de menor duración temporal, es decir, la amplitud del eco de interfaz cae 20dB a 0,5mm de la entrada al material (Figura 8). En consecuencia, se logra una alta capacidad de detección de discontinuidades cercanas a la superficie. Estas condiciones resultaron particularmente adecuadas para establecer una línea base de desempeño del método antes de su aplicación en escenarios representativos de campo.

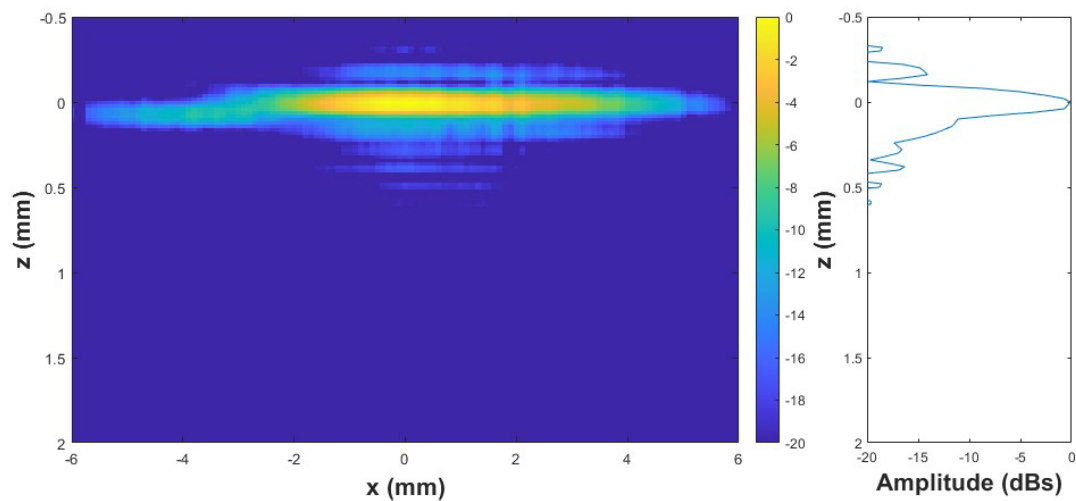


Figura 8: Eco de interfaz (ingreso al material) bien definido con transductor de 15 MHz.

Una vez establecidos los parámetros de adquisición y validado el procedimiento experimental, se procedió al procesamiento de los datos FMC mediante reconstrucción TFM, obteniéndose la representación espacial de la totalidad de los reflectores artificiales presentes en la pieza patrón.

La Figura 9 muestra la imagen B-Scan generada por TFM y correspondiente a una pérdida de espesor. La imagen fue generada mediante procesamiento de la FMC, permitiendo representar la

variación de espesores en toda la superficie inspeccionada. En dicha representación es posible identificar claramente la ubicación, extensión y profundidad relativa de los agujeros de fondo plano (FBH), evidenciando la capacidad del método para discriminar reflectores de distintas profundidades dentro de la misma pieza.

La homogeneidad de la respuesta en las zonas sin mecanizado y la adecuada definición geométrica de los reflectores confirman la correcta calibración del sistema y la estabilidad del procedimiento de adquisición. Estos resultados constituyen la base de referencia para la posterior evaluación sobre discontinuidades reales.

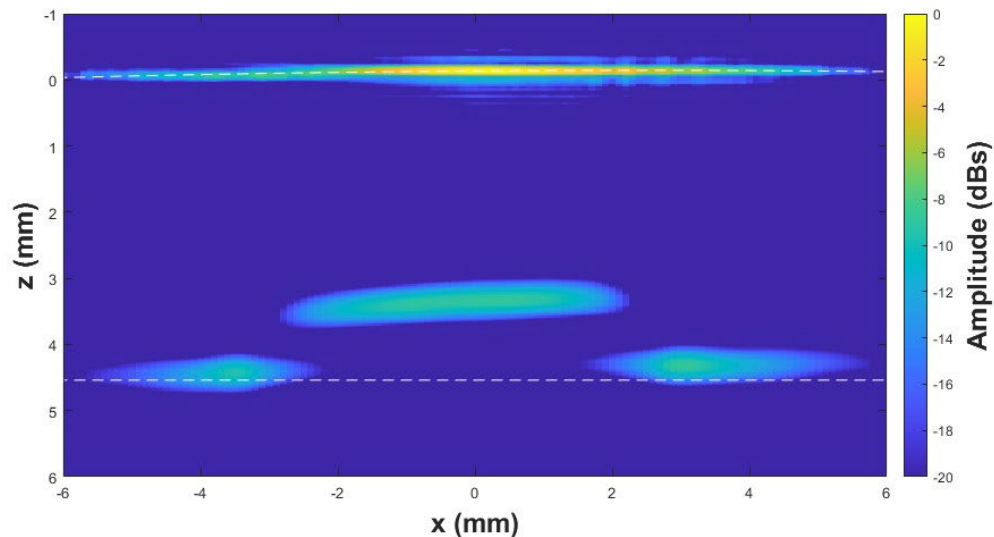


Figura 9: Imagen TFM de un FBH de 1 mm de profundidad.

1.3.1 Evaluación sobre defectos volumétricos reales

Una vez verificado el desempeño del sistema mediante la pieza patrón con reflectores artificiales, se procedió a la inspección de una segunda muestra del mismo material base, en la cual se generaron discontinuidades volumétricas representativas de pérdida de material (Figura 10).



Figura 10: Probeta con defectos volumétricos provocados.

El objetivo de esta etapa fue evaluar el desempeño del TFM frente a defectos de morfología irregular, alejados de las geometrías idealizadas de los reflectores mecanizados. Para ello,

conservando los ajustes iniciales (transductor lineal de 15 MHz y sistema de inmersión), se volvió a escanear la pieza, asegurando las condiciones y coherencia con el procedimiento validado.

No obstante, en esta instancia la adquisición y el procesamiento se efectuaron mediante el equipo portátil con capacidad TFM, lo que permitió generar representaciones en formatos C-Scan (vista en planta) y B-scan (perfil en profundidad) a partir de los datos FMC adquiridos (Figura 11), para evaluar tanto la pérdida de material como su extensión geométrica dentro del espesor.

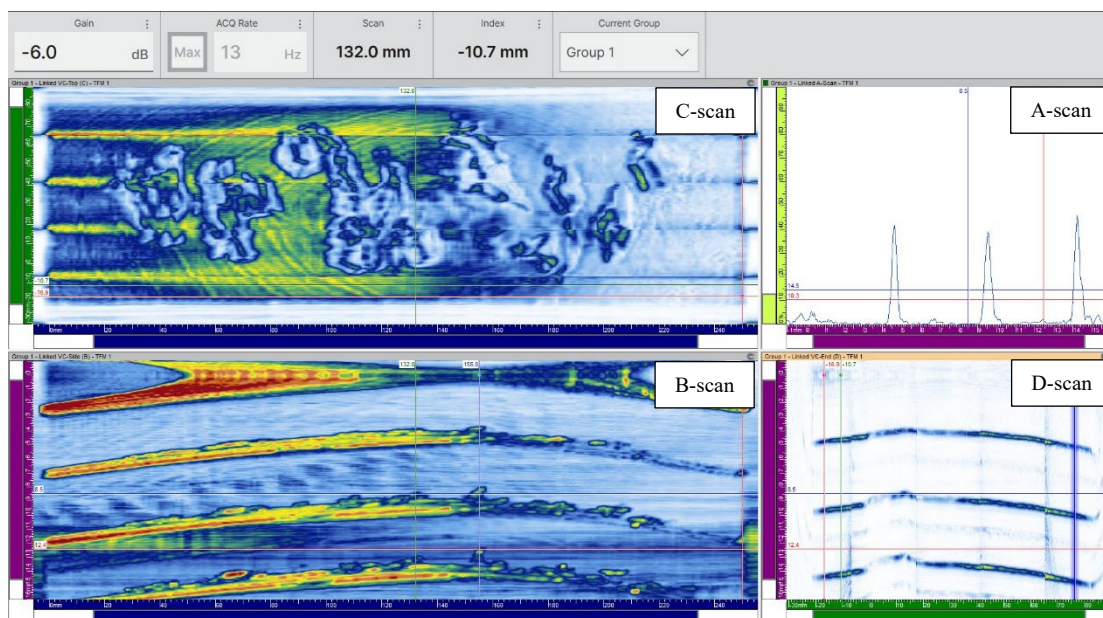


Figura 11: Escaneo con TFM de probeta con defectos volumétricos provocados.

1.3.2 Mapeo de corrosión en chapa con ranurados y sobreespesor de soldadura

En la tercera etapa se realizó un mapeo de pérdida de espesor sobre una chapa de acero de características similares al material patrón, que presenta ranurados mecanizados y una soldadura superficial que introduce un sobre espesor localizado (Figura 12). Este caso permite evaluar el desempeño del TFM frente a variaciones geométricas tanto por disminución como por incremento de espesor, reproduciendo condiciones típicas que se encuentran en componentes en servicio.



Figura 12: *Probeta de acero al carbono de 7,2 mm de espesor nominal, que presenta un cordón de soldadura generando un sobre espesor localizado y ranurados mecanizados destinados a emular pérdida de material por corrosión.*

Este ensayo se realizó con un equipo portátil Phased Array con capacidad de adquisición FMC y reconstrucción TFM en tiempo real, acoplado a un transductor tipo wheel array (Figura 6). El objetivo fue simular una condición real de inspección en campo, priorizando velocidad de adquisición, estabilidad de acoplamiento y generación de mapas de espesor en modo C-Scan.

Esta experiencia permite analizar la aplicabilidad práctica del método TFM en entornos industriales, evaluando su desempeño operativo bajo condiciones más cercanas a la inspección real, donde factores como la movilidad del sistema, la ergonomía y la productividad del escaneo adquieren relevancia, obteniendo resultados con imágenes ultrasónicas bien definidas y de fácil interpretación.

En las Figuras 13 y 14 se presentan los resultados del escaneo realizado en la zona correspondiente a los ranurados mecanizados. La visualización combinada de las cuatro vistas disponibles (C, B, D y A-Scans) permite realizar una caracterización geométrica integral de las discontinuidades, posibilitando la medición precisa de la profundidad, longitud y ancho de las ranuras.

En la Figura 15 se muestra el análisis efectuado en la región donde se encuentra el sobre espesor generado por el cordón de soldadura. En este caso, las imágenes permiten diferenciar claramente entre variaciones volumétricas positivas (incremento de espesor) y negativas (pérdida de material). Asimismo, la irregularidad observada en los perfiles de espesor evidencia la presencia de corrosión generalizada tipo pitting, manifestada como pequeñas depresiones distribuidas sobre la superficie inspeccionada.

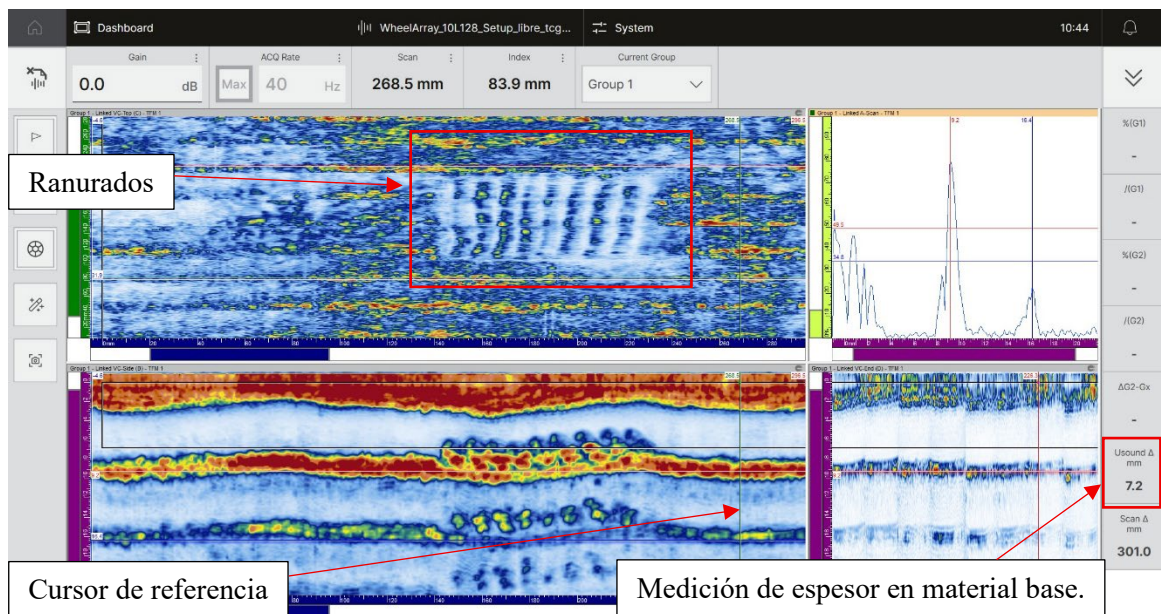


Figura 13: Escaneo en la zona de los ranurados. Medición de espesor sobre el material base.

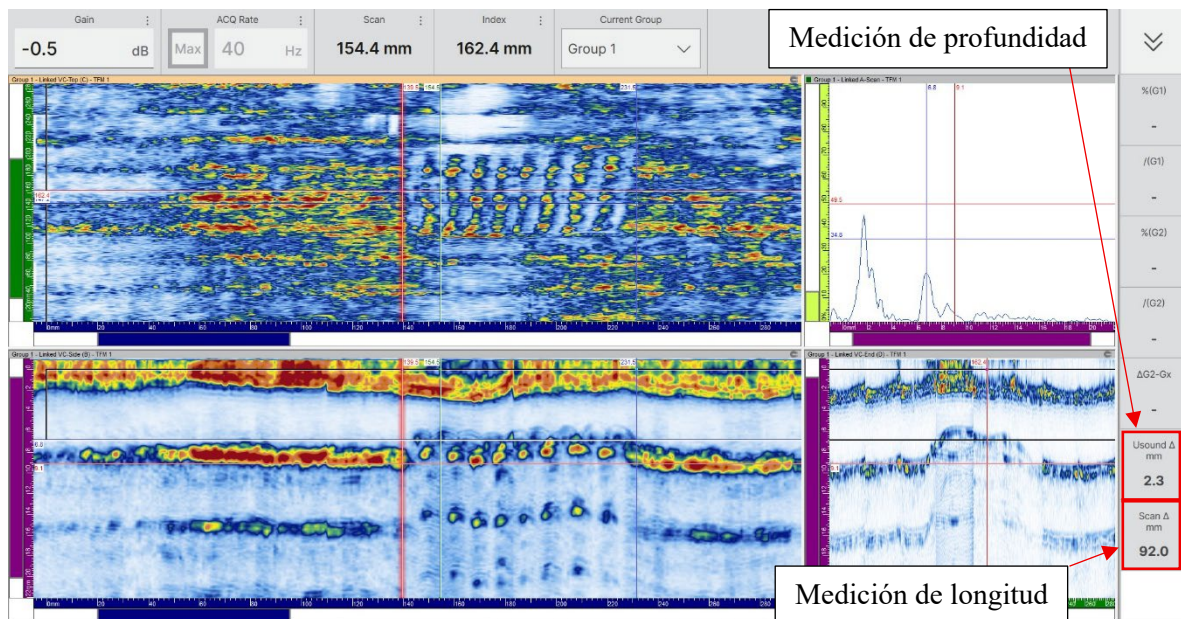


Figura 14: Escaneo en la zona de los ranurados. Medición de profundidad y extensión en donde se encuentran las ranuras.

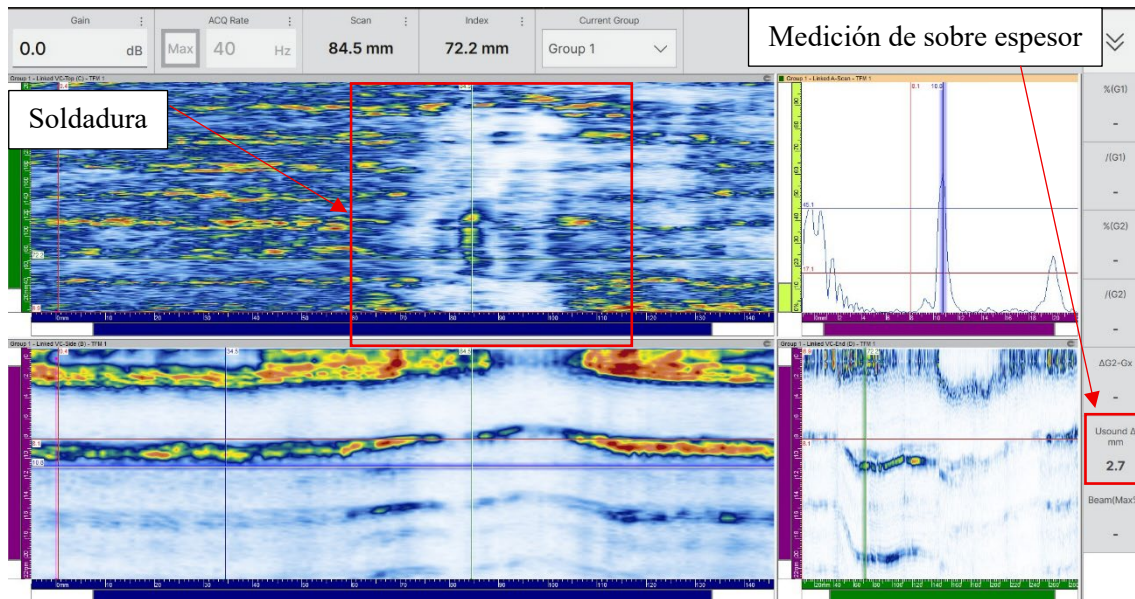


Figura 15: Escaneo en la zona de la soldadura. Medición de sobre-espesor.

2. RADIOGRAFÍA DIGITAL APLICADA A INSPECCIONES DE CORROSIÓN

2.1 FUNDAMENTOS DE LA TÉCNICA

La inspección de pérdida de material mediante radiografía digital con detectores de arreglo digital (DDA) se basa en el principio físico de la atenuación de la radiación ionizante al atravesar un material. Cuando un haz de rayos X incide sobre un componente metálico, su intensidad disminuye en función del espesor recorrido, de la naturaleza del material y de la energía del haz incidente. Este comportamiento se describe mediante la ley de atenuación exponencial, donde la intensidad transmitida depende del coeficiente de atenuación lineal, el cual es característico del material, pero también varía con la energía de los fotones utilizados.

$$I(x, y) = I_0(x, y) \cdot \int_0^{E_{max}} \sigma(E) \cdot e^{-\mu(E) \cdot z} dE$$

En un sistema DDA, la radiación transmitida es convertida en una señal digital cuya magnitud se representa como niveles de gris en la imagen radiográfica. De esta manera, existe una relación directa entre el espesor local del material y el valor de gris registrado por el detector: a mayor espesor, mayor atenuación y, por lo tanto, menor intensidad registrada. Sin embargo, debido al comportamiento exponencial del fenómeno y a la influencia de factores como la energía del haz, la dispersión y la respuesta del detector, esta relación no es lineal, lo que hace imprescindible establecer una calibración adecuada para cuantificar las variaciones de espesor con precisión. Por ejemplo, se puede ver como es la atenuación para el material con el que se realizaron las pruebas a lo largo del espesor (Figura 16).

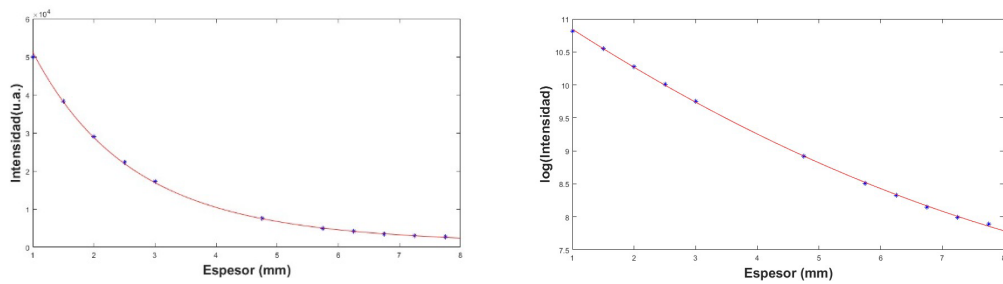


Figura 16: Atenuación de la intensidad de rayos X a lo largo del espesor del patrón de referencia.

La correcta calibración del sistema resulta entonces un aspecto crítico en aplicaciones de medición de corrosión. Para transformar variaciones de niveles de gris en valores de espesor real, es necesario trabajar con referencias de espesor conocido bajo las mismas condiciones geométricas y energéticas de adquisición. Solo mediante esta correlación es posible reducir incertidumbres y garantizar trazabilidad metrológica en la determinación de pérdida de material.

Desde el punto de vista operativo, la radiografía digital presenta ventajas significativas en aplicaciones de inspección de ductos y estructuras industriales. A diferencia del ultrasonido, la técnica no requiere contacto directo ni acoplamiento acústico, lo que en muchos casos permite realizar evaluaciones sin necesidad de remover revestimientos externos o aislaciones, siempre que la configuración geométrica y la energía utilizada lo permitan. Asimismo, la posibilidad de inspeccionar áreas relativamente amplias en una única exposición puede traducirse en tiempos de evaluación reducidos, particularmente en configuraciones de campo donde la rapidez de diagnóstico es un factor determinante.

2.2 CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL Y EQUIPAMIENTO

Para la realización de los ensayos radiográficos se empleó el sistema de radiografía digital **beXna**¹ de diseño propio, basado en tecnología de Detector de Arreglo Digital (DDA), con resolución espacial de 99 μm , modelo BXN-V 1025B. Este tipo de detector convierte la radiación transmitida en señales digitales que son procesadas y representadas como una matriz de niveles de gris, permitiendo la visualización inmediata y el análisis cuantitativo de las variaciones de espesor.



Figura 17: Panel de radiografía digital (DDA) beXna.

¹ **beXna**[®] es un desarrollo tecnológico propio de Besna MyT S.A. y constituye una marca registrada de la compañía.

Como fuente de radiación se utilizó un tubo de rayos X industrial Yxlon con tensión máxima de 160 kV y tamaño de foco nominal de 1 mm. La selección del kilovoltaje de operación se realizó en función del espesor del material inspeccionado, buscando un equilibrio entre penetración suficiente y sensibilidad frente a pequeñas variaciones de espesor. El tamaño del foco empleado permite limitar el desenfoque geométrico, contribuyendo a mejorar la definición espacial de la imagen radiográfica.

La configuración geométrica de inspección (distancia foco–objeto–detector y alineación del sistema) fue establecida de manera controlada para asegurar repetibilidad en las adquisiciones y garantizar la validez de la calibración posterior entre niveles de gris y espesor.

Adicionalmente, se empleó un bloque de calibración (step wedge) fabricado en el mismo material que las probetas ensayadas, y dispone una serie de escalones de espesores conocidos (Figura 18). La utilización de este bloque permite construir la curva de calibración necesaria para la posterior cuantificación de pérdida de espesor mediante interpolación de valores.



Figura 18: *Probeta escalonada para calibración.*

2.3 VALIDACIÓN Y DESARROLLO EXPERIMENTAL

Con el fin de establecer una correlación cuantitativa entre niveles de gris y espesores reales, se tomó una radiografía digital de la pieza patrón con agujeros de fondo plano (FBH) previamente evaluada mediante TFM (Figura 7). Esta estrategia permitió trabajar sobre una geometría conocida y ya caracterizada por ultrasonido, asegurando condiciones de referencia controladas.

Durante la adquisición radiográfica se dispuso conjuntamente el bloque escalonado de calibración y expuesto bajo idénticas condiciones geométricas y energéticas. A partir de los valores de gris obtenidos de imágenes (Figura 19), en cada escalón de espesor conocido, se construyó la relación funcional entre atenuación registrada y espesor real.

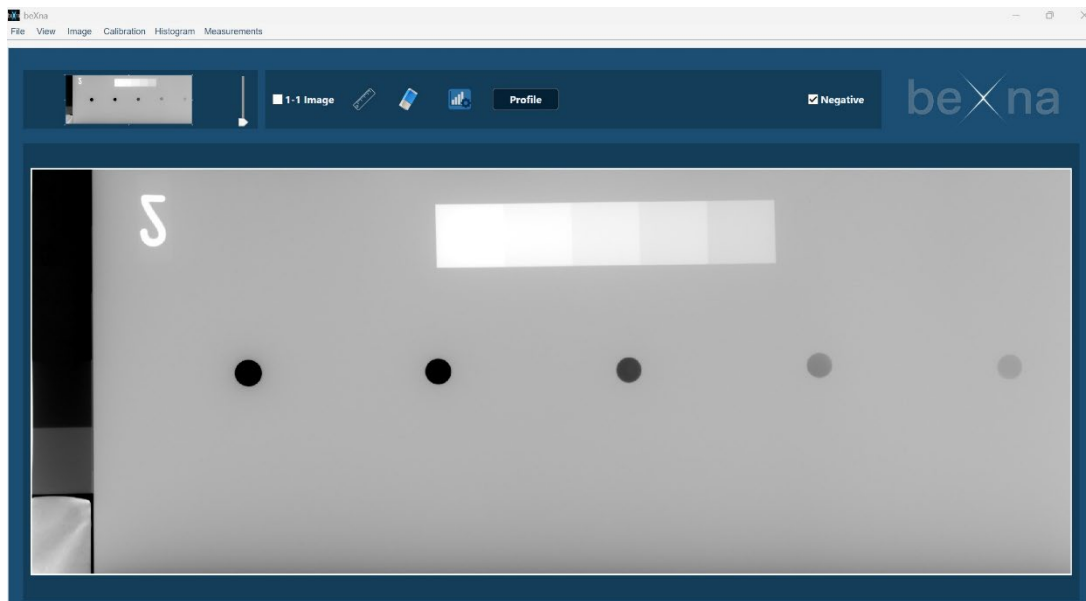


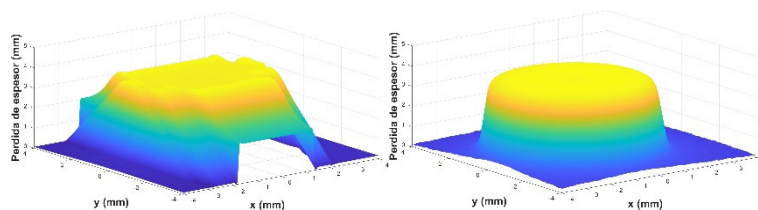
Figura 19: Placa radiográfica FBH con probetas escalonadas de calibración.

En estas condiciones controladas, fue posible correlacionar de manera precisa los niveles de gris medidos con las profundidades correspondientes a los FBH de la pieza patrón, validando la metodología de calibración propuesta. Esta etapa constituyó la base para la posterior aplicación del procedimiento a configuraciones con pérdida de material de morfología más compleja.

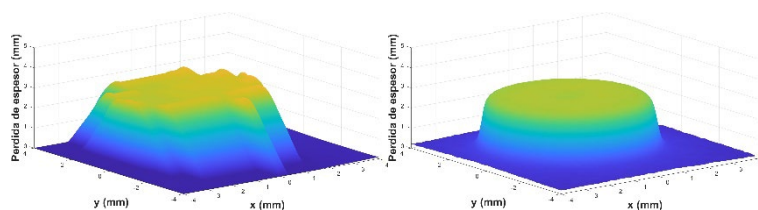
Luego, se realizó una correlación de los datos obtenidos de la pieza patrón con los métodos de radiografía digital y TFM. Como se puede observar en la Figura 20, a la izquierda los datos que se obtuvieron por TFM y a la derecha las medidas que se obtuvieron con radiografía digital.

Cabe destacar que estas pruebas experimentales se realizaron a la misma distancia del DDA respecto al foco del tubo de rayos X (1 metro), con un foco de 1 mm y que fueron hechas a tres niveles de energía distintos: 100 kV, 110kV y 130kV.

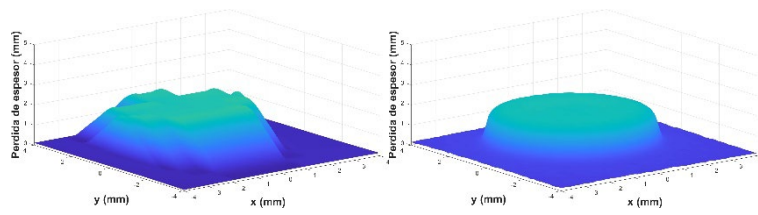
FBH-1: 3,9 mm



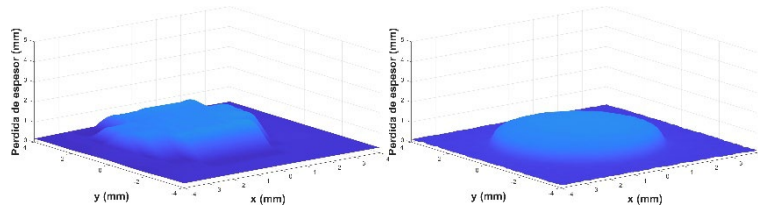
FBH-2: 3 mm



FBH-3: 2 mm



FBH-4: 1 mm



FBH-4: 0,6 mm

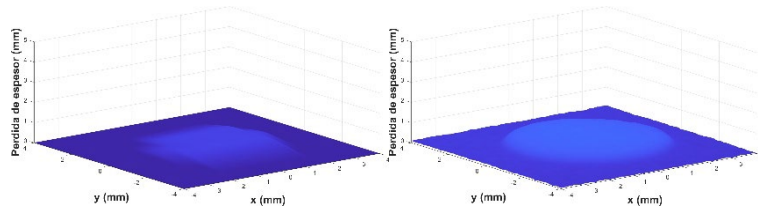
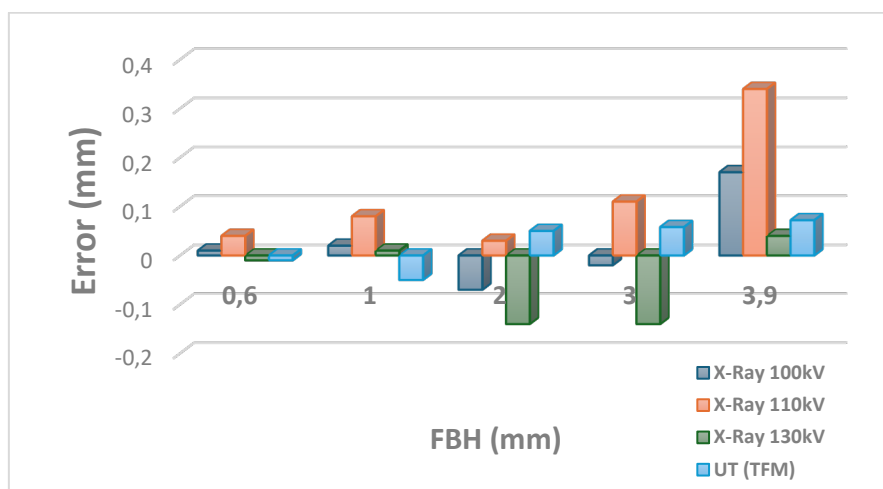


Figura 20: Comparación de datos obtenidos por TFM y con Radiografía digital de los FBH.

En la Figura 20 se puede ver como con radiografía digital ofrece una buena resolución geométrica, ya que esto depende de la resolución espacial del detector, en este caso de 99 μm . En ultrasonido, esta resolución va a depender de la longitud de onda seleccionada, en este caso es cercana a 300 μm y por lo tanto, las imágenes se ven más irregulares. No obstante, es posible observar los errores de medición que arrojaron los resultados respecto a la dimensión real de cada FBH (Figura 21). La dispersión observada en las mediciones presenta una desviación estándar inferior a 0,15 mm bajo condiciones controladas.



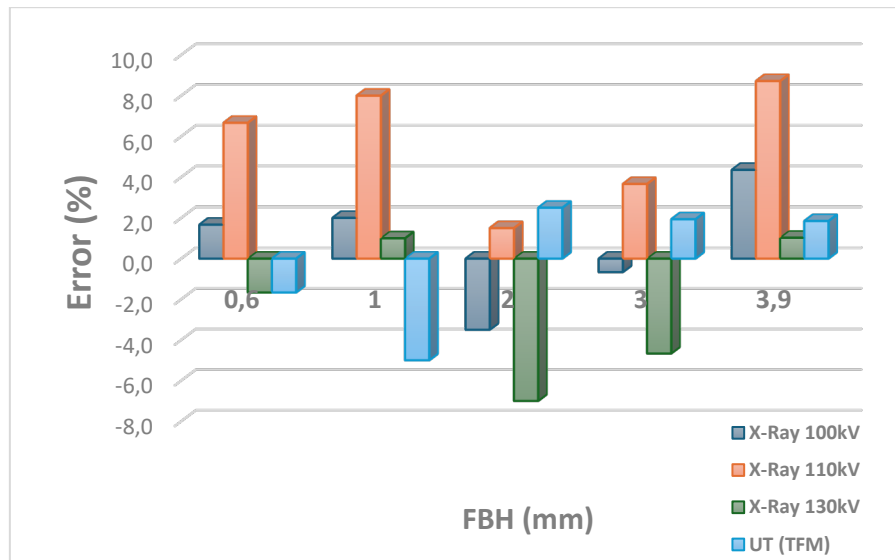


Figura 21: *a) Error absoluto respecto a la dimensión real de cada FBH. b) Error porcentual respecto a la dimensión real de cada FBH.*

2.3.1 Evaluación sobre defectos volumétricos reales

Con el objetivo de evaluar el desempeño de la metodología de calibración propuesta frente a discontinuidades de morfología irregular, se obtuvo la radiografía digital de la pieza con defectos volumétricos generados artificialmente (Figura 10).

La adquisición se llevó a cabo bajo las mismas condiciones geométricas y energéticas empleadas durante la calibración con el bloque escalonado de referencia, garantizando la validez de la correlación entre niveles de gris y espesor. A partir de la curva de calibración obtenida, se procedió a estimar el espesor remanente en las zonas afectadas por pérdida de material mediante interpolación de los valores de gris registrados en la imagen radiográfica.

Las imágenes obtenidas permitieron identificar claramente las zonas de menor espesor, evidenciando una variación tonal coherente con la disminución local de material (Figura 22). La aplicación del modelo de correlación posibilitó cuantificar la profundidad equivalente de las discontinuidades, demostrando la aplicabilidad del procedimiento en defectos de geometría no idealizada.

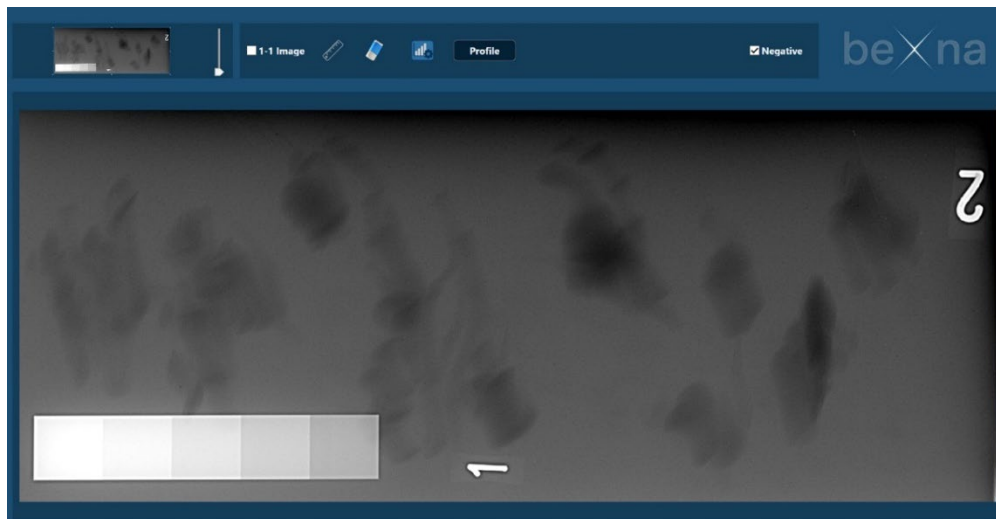


Figura 22: Imagen radiográfica de probeta con defectos volumétricos provocados.

A modo de correlacionar y comparar los resultados de la radiografía digital con los datos TFM representados en un C-scan (Figura 23) se realizó un escaneo 3D de la pieza con una cámara ToF (Time of flight) con luz infrarroja y se extrajo la vista superior (Figura 24).

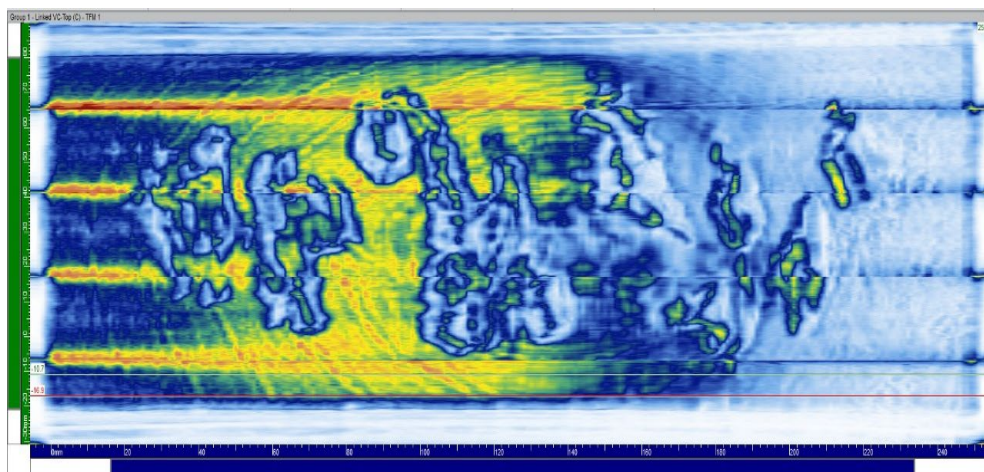


Figura 23: Imagen C-Scan de pieza con defectos volumétricos provocados.

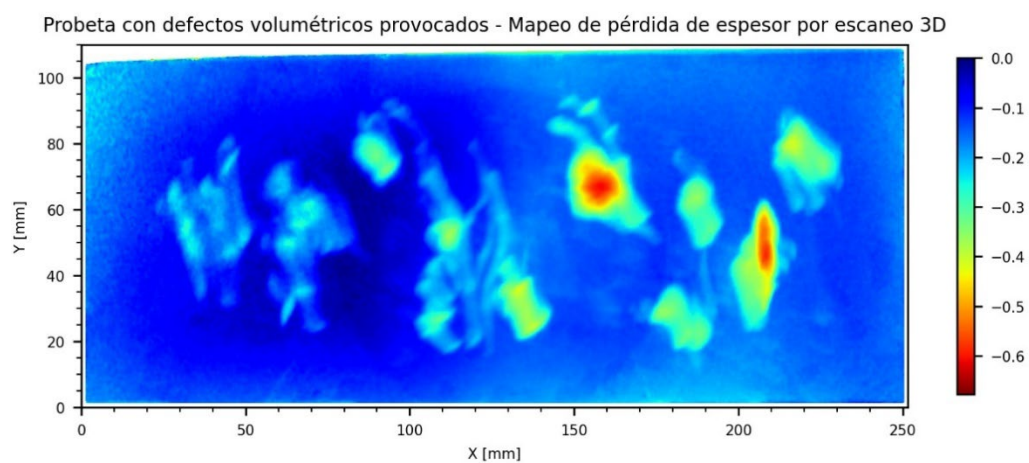


Figura 24: Imagen extraída de escaneo 3D de probeta con defectos volumétricos provocados.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrolló y validó experimentalmente una metodología integral para la caracterización cuantitativa de pérdida de espesor por corrosión en ductos, mediante la aplicación comparativa del Total Focusing Method (TFM) y la Radiografía Digital con detectores de arreglo digital (DDA) flexible.

La utilización de un mismo patrón de referencia con reflectores artificiales (FBH), junto con bloques escalonados de espesores conocidos, permitió establecer procedimientos de calibración trazables y repetibles para ambas técnicas, posibilitando una comparación directa bajo condiciones controladas. Los resultados evidenciaron una adecuada correlación entre las mediciones obtenidas por TFM y aquellas estimadas mediante interpolación radiográfica de niveles de gris, validando la coherencia metrológica del enfoque propuesto.

Desde el punto de vista de resolución espacial, la radiografía digital demostró una elevada definición geométrica lateral asociada al tamaño de pixel del detector ($\approx 99 \mu\text{m}$), permitiendo una delimitación precisa de contornos y diámetros aparentes de discontinuidades. En contraste, el TFM presenta una resolución lateral condicionada por la longitud de onda acústica y la apertura efectiva del arreglo; sin embargo, ofrece una determinación de profundidad más robusta, basada directamente en el tiempo de vuelo y en la reconstrucción focalizada punto a punto dentro del volumen inspeccionado.

En términos de incertidumbre, la medición ultrasónica mediante TFM mostró mayor confiabilidad en la determinación del espesor remanente, al depender de parámetros físicos bien definidos (velocidad acústica y sincronización temporal). Por su parte, la cuantificación radiográfica, si bien viable mediante calibración específica, se encuentra influenciada por variables adicionales tales como energía del haz, geometría foco–objeto–detector y respuesta del sistema digital, lo que requiere un control metrológico riguroso para minimizar dispersiones.

Desde una perspectiva de integridad estructural, la reducción de la incertidumbre en la medición de pérdida de espesor constituye un factor crítico, dado que pequeñas variaciones en el espesor remanente pueden impactar significativamente en la estimación de presión admisible, vida remanente y decisiones operativas asociadas a reparación o monitoreo. En escenarios típicos de evaluación mediante ASME B31G o DNV RP-F101, diferencias del orden de décimas de milímetro en el espesor remanente pueden traducirse en variaciones relevantes en la presión admisible calculada, reforzando la necesidad de mediciones con baja incertidumbre y adecuada trazabilidad metrológica.

Operativamente, se comprobó la viabilidad del uso de sistemas portátiles con transductores tipo wheel array para inspecciones en campo, permitiendo generar mapas de espesor con adecuada productividad y estabilidad de acoplamiento. Asimismo, la radiografía digital con detectores flexibles se presenta como una alternativa particularmente ventajosa en escenarios donde la remoción de recubrimientos o aislaciones resulta inviable o costosa.

En consecuencia, ambas técnicas deben considerarse complementarias dentro de un programa moderno de gestión de integridad: la radiografía digital aporta alta definición geométrica y ventajas operativas específicas, mientras que el TFM ofrece una medición directa y metrológicamente robusta del espesor remanente. La integración estratégica de ambas

metodologías permite reducir la incertidumbre global del diagnóstico, optimizar la toma de decisiones y fortalecer los programas de evaluación de integridad en ductos sometidos a corrosión localizada.

Si bien ambas técnicas muestran alta capacidad de caracterización geométrica y cuantificación de pérdida de espesor, su desempeño puede verse influenciado por factores tales como condiciones superficiales del componente inspeccionado, estabilidad geométrica del sistema radiográfico, parámetros energéticos seleccionados y demanda computacional asociada a reconstrucciones TFM de alta resolución. Estos aspectos deben ser considerados dentro del marco de aplicación industrial de cada metodología.

Los resultados obtenidos evidencian el valor estratégico de contar con capacidades tecnológicas propias, integración multidisciplinaria y desarrollo de instrumentación avanzada dentro de una misma organización, permitiendo abordar desafíos complejos de integridad estructural con mayor control metrológico y menor dependencia de soluciones externas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su especial agradecimiento a Nicolas Bonadeo (Tenaris), Alan Villarreal, Exequiel Mezza, Emilio Olivar, Claudio Ziobrowski y a la empresa Aeroend por su compromiso y valioso soporte técnico durante la planificación y ejecución de las campañas experimentales realizadas en este trabajo. Su colaboración fue fundamental para el desarrollo y validación de los ensayos presentados.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Fundamentals of Ultrasonic Phased Arrays – Lester W. Schmerr Jr. (2015).
- [2] Brizuela, J., Camacho, J., Cosarinsky, G., Iriarte, J.M., Cruza, J.F., “Improving elevation resolution in phased-array inspections for NDT,” NDT&E International, vol. 101, pp. 1–16, 2018.
- [3] Olympus -Phased Array Testing – Basic Theory for Industrial Applications. (2010).
- [4] Cosarinsky, G., Cruza, J., Brizuela, J., Iriarte, J.M., Camacho, J., “Virtual Array Plane Wave Imaging,” 2021 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), 2021.
- [5] Enhanced Imaging of Corrosion in Aircraft Structures with reverse Geometry X-Ray – William P. Winfree - Noreen A. Cmar-Mascis – Raymond Prker – (2004).
- [6] Corrosion Evaluation of Pipes By Radiography – N.Rastkhak – K.Edalati – A.Kermani.
- [7] Nondestructive Testing Handbook – Radiographic Testing Volume 4 – Richard Bossi – Frank Iddings – George Wheeler (2002).

CURRICULUMS VITAE DE AUTORES

Russo, Fabrizio Lautaro

Título y Lugar de Estudio: Ingeniero Mecánico – Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires (UBA), Argentina. Especialista en Ensayos no Destructivo (Instituto Sábato)

Trayectoria: Ingeniero Mecánico con experiencia en análisis de tensiones en cañerías y recipientes a presión, y desarrollo e implementación de técnicas avanzadas de Ensayos No Destructivos, incluyendo Ultrasonido Phased Array, TFM y Radiografía Digital con detectores DDA. Ha participado en proyectos de ingeniería asociados a equipos rotantes y sistemas mecánicos complejos. Desarrollador en proyecto beXna (Panel de radiografía digital). Cursos de END: Radiografía industrial (Nivel 1) y Phased Array (Nivel 1) por norma ISO-9712:2014.

Cargo actual en la empresa: Ingeniero mecánico - Desarrollador de tecnologías para END – Besna MyT SA.

Sanchez De Paulis, Sebastián

Título y Lugar de Estudio: Ingeniero Mecánico – Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires (UBA), Argentina.

Trayectoria: Ingeniero Mecánico con experiencia en análisis estructural y evaluación de integridad de ductos e instalaciones industriales. Se desempeña en proyectos vinculados a análisis fractomecánico, evaluación Fitness For Service según API 579, modelado por elementos finitos y desarrollo de soluciones de ingeniería para la industria Oil & Gas. Ha participado en trabajos de investigación y presentaciones en congresos técnicos en el área de materiales y comportamiento mecánico. Cuenta con experiencia académica como docente en el área de Mecánica del Sólido en la UBA. Diseñador mecánico en proyecto beXna (Panel de radiografía digital).

Cargo actual en la empresa: Ingeniero mecánico – Diseñador – Besna MyT SA.

Iglesias Raggio, Leandro

Título y Lugar de Estudio: Licenciado en Ciencias Físicas – Universidad de Buenos Aires (UBA), Argentina. Estudios de Doctorado en Massachusetts Institute of Technology (MIT), EE.UU. (no finalizados).

Trayectoria: Especialista con más de 20 años de experiencia en investigación, desarrollo e implementación de tecnologías avanzadas de ultrasonido aplicadas a Ensayos No Destructivos. Se desempeñó durante 12 años en el Centro de Investigación Industrial de Tenaris-Siderca en el área de Física Aplicada, especializándose en técnicas ultrasónicas. Desde 2016 trabaja como consultor en ultrasonido y nuevas tecnologías, colaborando con empresas internacionales del sector industrial y energético. Cuenta con experiencia en simulación ultrasónica (CIVA), desarrollo de software para adquisición y procesamiento de datos, y optimización de metodologías de inspección.

Cargo actual en la empresa: Programador y Desarrollador de tecnologías para END – Besna MyT S.A.

Brizuela, José

Título y Lugar de Estudio: Dr. Ing. en Sistemas y Automática – Universidad Complutense de Madrid (España, 2010). Ingeniero Electrónico – Universidad Tecnológica Nacional (Argentina).

Trayectoria: Más de 20 años de experiencia en investigación aplicada y desarrollo industrial de tecnologías de ultrasonido avanzado para Ensayos No Destructivos (Phased Array, FMC, TFM, PWI, PCI). Impulsor del proyecto beXna, orientado al desarrollo de sistemas de radiografía digital de alta resolución para aplicaciones industriales críticas. Su trabajo se centra en el desarrollo de sistemas para la caracterización cuantitativa de defectos y en la reducción de incertidumbre metrológica en evaluaciones de integridad estructural bajo estándares ASME, DNV y API.

Cargo actual en la empresa: CEO y fundador de Besna MyT S.A., liderando el desarrollo y transferencia de soluciones tecnológicas de inspección avanzada para la gestión de integridad de activos industriales críticos.