

AUTOMATIZACIÓN DE LA INSPECCIÓN VISUAL DIGITAL (IVD)

Facundo A. Lohrengel / Luis A. Ohara / Mauricio R. Bertotto, Petromark SRL

facundo.lohrengel@petromark.com.ar / luis.ohara@petromark.com.ar / mauricio.bertotto@petromark.com.ar

Sinopsis

La Inspección Visual Digital (IVD) constituye una técnica fundamental dentro de los Ensayos No Destructivos (END) aplicados a la integridad de tuberías. Su automatización posibilita un relevamiento más preciso y uniforme, disminuyendo la dependencia del operador y aumentando la confiabilidad en la detección de daños por corrosión u otros mecanismos de deterioro.

En los relevamientos de tuberías mediante Inspección Visual Digital (IVD) realizados manualmente por un operador, suelen presentarse desviaciones asociadas a variaciones en la velocidad de barrido y en el ángulo de incidencia del sensor, especialmente en entornos confinados o de difícil acceso donde mantener parámetros operativos constantes resulta complejo. Estas limitaciones pueden derivar en zonas sin inspeccionar o en la generación de archivos de gran tamaño por redundancia de datos. La automatización de esta inspección mediante un dispositivo permite superar dichas dificultades mediante el control preciso de los desplazamientos longitudinales y rotacionales del escáner, asegurando trayectorias estables. De este modo, se reduce la variabilidad dependiente del operador, se minimiza la dispersión en los registros y se obtienen bases de datos digitales más compactas y confiables.

Entre las características más destacadas del dispositivo se encuentran:

- Precisión y estabilidad: El dispositivo incorpora un sistema de sensado angular basado en una MPU-6050, que integra acelerómetro y giroscopio, permitiendo determinar en tiempo real la posición del escáner respecto a la tubería. Complementariamente, dispone de un freno inteligente controlado por señal PWM (Pulse Width Modulation) variable, que corrige desvíos de posición y asegura la estabilidad angular en cada punto de medición.
- Cobertura completa: el sistema garantiza la perpendicularidad del escáner y mantiene una velocidad constante de barrido, evitando zonas sin inspeccionar.
- Flexibilidad de uso: cuenta con modos manual y automático, lo que permite repetir ensayos en áreas específicas o ejecutar un ciclo de escaneo completo.
- Adaptabilidad: El diseño del dispositivo permite su ajuste a distintos diámetros de tuberías, abarcando un rango desde 8" hasta 32", lo que amplía su uso en diversos entornos de inspección en tuberías.
- Optimización de recursos: al reducir la intervención directa del operador y los errores asociados, se mejora la eficiencia del proceso.

Introducción

En los Ensayos No Destructivos aplicados a la integridad de tuberías, la IVD (Inspección Visual Digital) permite detectar y documentar de manera objetiva indicaciones asociadas a corrosión y a otros mecanismos de deterioro aplicando los estándares de ASME B31 G, ASME B31 G Modificada.

En este tipo de relevamientos, la calidad del registro no depende solo del sensor, sino también de las condiciones con las que se ejecuta el barrido.

Cuando la IVD se realiza de forma manual, es común que aparezcan desviaciones por cambios en la velocidad de desplazamiento y en el ángulo de incidencia del sensor, situación que se acentúa en entornos confinados o de acceso complejo, donde resulta difícil sostener parámetros operativos constantes. Esto puede derivar en sectores sin cubrir o, en el extremo opuesto, en registros con redundancia de información que incrementan el tamaño de los archivos y dificultan el análisis posterior.

Como mejora a estas limitaciones, la automatización del escaneo permite controlar con precisión los desplazamientos longitudinales y rotacionales, asegurando trayectorias estables y reduciendo la variabilidad asociada del operador. En este enfoque, el dispositivo propuesto incorpora un sensado angular mediante una MPU-6050 (Unidad de Procesamiento de Movimiento) que integra un acelerómetro y giroscopio para conocer en tiempo real la posición del escáner respecto de la tubería, además integra un sistema de corrección basado en un freno inteligente por PWM (Modulación por Ancho de Pulso) variable, orientado a compensar desvíos y mantener la estabilidad angular en cada punto de medición.

El objetivo de este desarrollo es realizar relevamientos del estado superficial de la tubería de forma más eficiente, asegurando condiciones de escaneo uniformes y una cobertura controlada de toda la superficie, minimizando el solapamiento de capturas y optimizando el peso de los archivos.

Desarrollo

Para la correcta aplicación del ensayo y la obtención de un relevamiento confiable de la superficie de la tubería, deben respetarse los lineamientos y recomendaciones establecidos por el fabricante durante la ejecución del escaneo. El cumplimiento de estos criterios operativos permite mantener condiciones de captura uniformes, reducir desviaciones asociadas a la técnica de barrido y garantizar la calidad del registro. A continuación, se detallan los aspectos a considerar:

- Colocación y distribución de targets de reconocimiento: sobre la superficie de la tubería se deben disponer targets (marcadores) que actúen como referencias para el posicionamiento y el seguimiento del escáner durante todo el barrido. Como se puede apreciar en la figura 1 los marcadores se distribuyen siguiendo un patrón triangular con una disposición aleatoria, de manera que el sistema mantenga referencias espaciales durante toda la inspección y se obtenga una reconstrucción fehaciente del estado de la tubería. Esto facilita la evaluación posterior conforme a los criterios aplicables (ASME B31G y ASME B31G Modificada).
- Orientación del dispositivo: el escáner debe mantenerse perpendicular a una distancia de 25cm de la superficie a inspeccionar durante todo el recorrido. Esta condición es crítica para controlar el ángulo de incidencia y evitar errores en la captura, como distorsiones en la reconstrucción o disminución de la calidad del registro.
- Punto de inicio del escaneo: para minimizar el error acumulado y mejorar la estabilidad del registro, el escaneo debe iniciarse desde la zona media de la tubería, estableciendo allí la referencia inicial del sistema. A partir de ese punto, se debe continuar el barrido de manera uniforme, manteniendo parámetros constantes como, distancia a la superficie de la tubería, velocidad de desplazamiento y orientación del escáner. Este criterio contribuye a sostener condiciones de captura más homogéneas durante todo el relevamiento, favoreciendo la continuidad del modelo reconstruido para su evaluación posterior.



Figura 1: disposición de los targets de reconocimientos.

Los movimientos involucrados del prototipo en el proceso de inspección se muestran en la Figura 2. El relevamiento se inicia tomando como referencia la zona media de la tubería, desde donde el sensor realiza el desplazamiento longitudinal a lo largo de la estructura hasta alcanzar el extremo. Una vez completado ese tramo, el dispositivo ejecuta un desplazamiento angular alrededor de la tubería con el objetivo de reposicionarse y preparar la siguiente trayectoria de escaneo. De este modo, el relevamiento se completa mediante una secuencia repetitiva de avance longitudinal y reposicionamiento angular, permitiendo cubrir la superficie de forma ordenada y bajo condiciones operativas más uniformes.

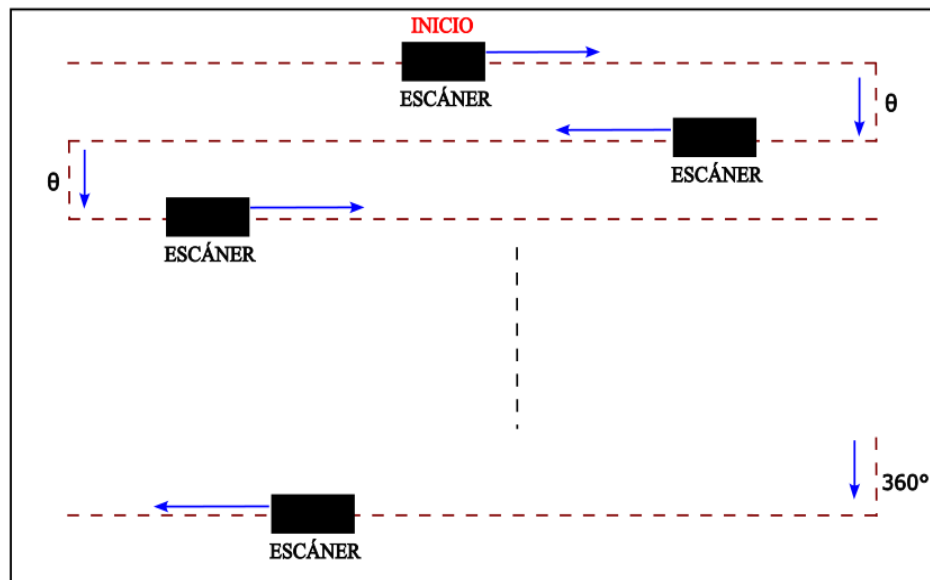


Figura 2: Trayectoria de escaneo: avance longitudinal y reposicionamiento circunferencial.

La automatización del ensayo se abordó mediante el control de dos movimientos principales del escáner sobre la tubería: el desplazamiento longitudinal, responsable de ejecutar el barrido a lo largo del eje de la tubería, y el desplazamiento circunferencial, encargado de reposicionar el escáner angularmente. La coordinación de ambos movimientos permite definir una trayectoria de inspección ordenada reduciendo la variabilidad propia de la ejecución manual realizada por un operador.

En la Figura 3.a se presenta un *render* en Fusion 360 correspondiente a la etapa de diseño donde se aprecian las soluciones adoptadas a partir de los movimientos que conlleva el ensayo. Por su parte, en la Figura 3.b se muestra el prototipo completamente ensamblado, evidenciando la implementación física del diseño y su configuración final para la realización del ensayo sobre las tuberías. A continuación, se describen las soluciones implementadas para los distintos tipos de movimiento.

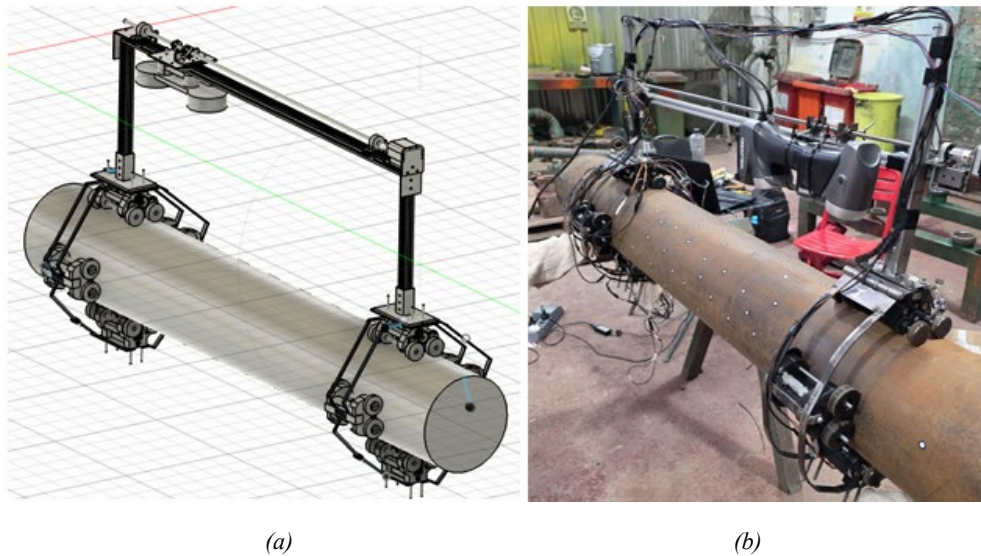


Figura 3: Visualización del prototipo completo en una perspectiva de frente y lateral; (a) Prototipo renderizado en Fusion360. (b) Prototipo físico en prueba de operatividad.

Diseño del movimiento circunferencial

El diseño circunferencial se desarrolló con el objetivo de adaptarse a diferentes diámetros de tubería, abarcando un rango comprendido entre 8" y 32". En la Figura 4, se observa que esta capacidad de adaptación se logra mediante un anillo metálico rígido modulable, cuya geometría permite variar su diámetro para ajustarse sobre la superficie externa de la tubería. De este modo, el anillo actúa como estructura principal de soporte, asegurando un acople estable del conjunto y proporcionando la rigidez necesaria para mantener el sistema correctamente posicionado durante la inspección.

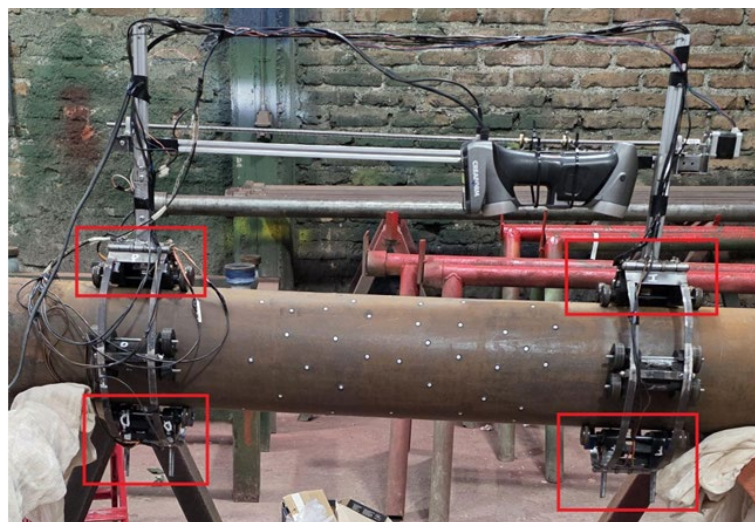


Figura 4: sistema de anillo.

El sistema de anillo está conformado por carros que se acoplan entre sí, tal como se muestra en la Figura 5. Este sistema emplea dos tipos de carros: carros principales, mostrados en la Figura 5.a, y carros accesorios, mostrados en la Figura 5.b.

Los carros principales se ubican en la tubería a 180° entre sí. Cada uno de estos carros integran motores de corriente continua con caja reductora, los cuales aportan el torque necesario para generar el desplazamiento circunferencial del prototipo.

Por su parte, los carros accesorios se incorporan a la estructura para aumentar el perímetro total del anillo, posibilitando la adaptación a tuberías de mayor diámetro. Además, contribuyen a reducir la fricción durante el movimiento.



Figura 5: Carros que componen el movimiento circunferencial; (a) Carro principal. (b) Carro accesorio.

Diseño del movimiento Longitudinal

El movimiento longitudinal del escáner sobre la tubería se implementó con el objetivo de realizar el barrido a velocidad controlada a lo largo de la superficie, asegurando un avance uniforme durante todo el ensayo. En la Figura 6 se presenta la configuración del sistema indicados con los siguientes números: 1) guía longitudinal, 2) cabezal móvil, 3) motor paso a paso y 4) varilla roscada. El escáner se monta sobre el cabezal, el cual se desplaza a lo largo de una guía metálica solidaria a los dos anillos de rotación. Esta guía actúa como referencia, orientando el movimiento y manteniendo el escáner perpendicular a la superficie de la tubería.

La transmisión del movimiento longitudinal se realiza mediante un motor paso a paso acoplado a la varilla roscada, lo que permite regular el avance a partir del control del motor y mantener una velocidad de desplazamiento estable durante la inspección. Como resultado, el barrido longitudinal se ejecuta con mayor uniformidad, reduciendo la probabilidad de generar zonas sin inspección asociadas a velocidades de desplazamiento elevadas.



Figura 6: movimiento longitudinal.

A fin de profundizar en el diseño del movimiento longitudinal, el vínculo entre el cabezal y la guía se resolvió mediante un encastre con ruedas plásticas, tal como se muestra en la Figura 7. Este tipo de acoplamiento permite guiar el desplazamiento con baja fricción, reduciendo vibraciones, lo que contribuye a un movimiento estable. Además, en la misma figura se detalla la fijación del cabezal a la guía de aluminio y su acople a la varilla roscada mediante un conjunto de tuercas de bronce, las cuales aseguran un avance firme y posicionamiento del escáner a lo largo del recorrido sobre la superficie de la tubería.

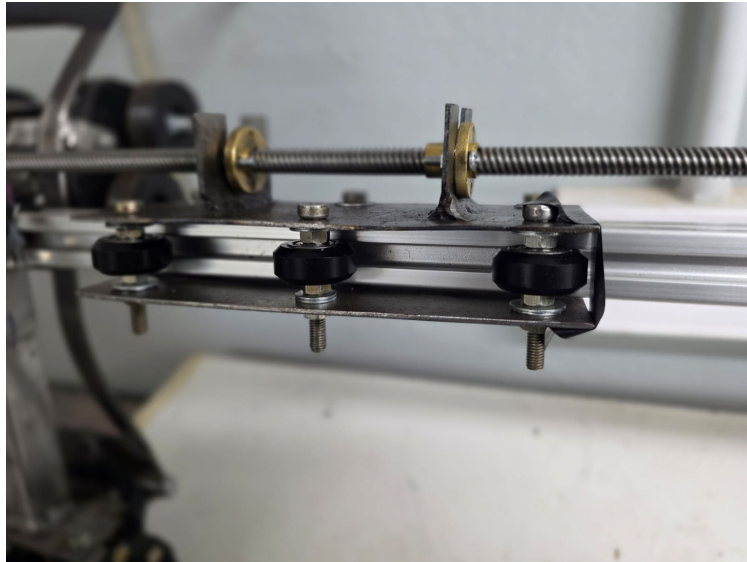


Figura 7: Cabezal.

Diseño electrónico

El sistema de control electrónico del prototipo se compone de un microcontrolador ESP32, puentes H, un sensor MPU6050 y finales de carrera. La ESP32 se encarga de ejecutar la lógica de control, interpretando las señales de los sensores y a su vez generar las señales de mando, las cuales son recibidas por los puentes H, responsables del accionamiento de los motores: por un lado, los motores DC encargados del desplazamiento angular, y por otro, el motor paso a paso empleado para el desplazamiento longitudinal del escáner sobre la tubería.

Para el control de la posición angular se utilizó el sensor MPU6050, el cual emplea tecnología MEMS (MicroElectroMechanical Systems) que integra acelerómetro y giroscopio, permitiendo estimar la orientación del prototipo y realimentar el sistema para mantener el movimiento dentro de los parámetros definidos. En cuanto al movimiento longitudinal, el mismo se realiza de manera continua y a velocidad constante. durante el barrido, con un recorrido delimitado por la longitud útil de la varilla roscada. Para garantizar que el sistema opere dentro de ese tramo y evitar sobre-recorridos, se incorporaron finales de carrera en ambos extremos, los cuales actúan como limitadores de seguridad y referencia de tope del desplazamiento.

En cuanto a la interacción con el usuario, la ESP32 genera una red Wi-Fi a la cual el operador se conecta mediante una computadora. Para facilitar la operación del sistema, se diseñó una interfaz gráfica desarrollada en LabVIEW, la cual se presenta en la Figura 8 y permite al usuario interactuar de forma directa con el dispositivo, seleccionando el modo de operación y definiendo la secuencia de movimiento.

La interfaz contempla un modo automático y un modo manual. Al ejecutar el modo automático, se inicia la ejecución autónoma del escáner sobre la superficie de la tubería. En modo manual, se habilitan comandos directos de los movimientos, permitiendo al operador efectuar posicionamientos, ajustes o repetición de tramos específicos cuando se requiera, mediante el uso del teclado de la notebook.



Figura 8: Interfaz gráfica.

En la Figura 9 se presenta un diagrama de flujo de la lógica del sistema y de sus dos modos de operación. Al ingresar “1” en la interfaz gráfica se accede al modo automático, en el cual se ejecuta de manera autónoma una secuencia de barrido predefinida sobre la superficie, ajustada al diámetro de la tubería a inspeccionar. Por su parte, al presionar “2” se habilita el modo manual, que permite al operador realizar movimientos controlados mediante las flechas del teclado, facilitando el posicionamiento en distintos sectores y la repetición de tramos específicos cuando sea necesario. De este modo, el microcontrolador coordina los desplazamientos en ambos modos de operación.

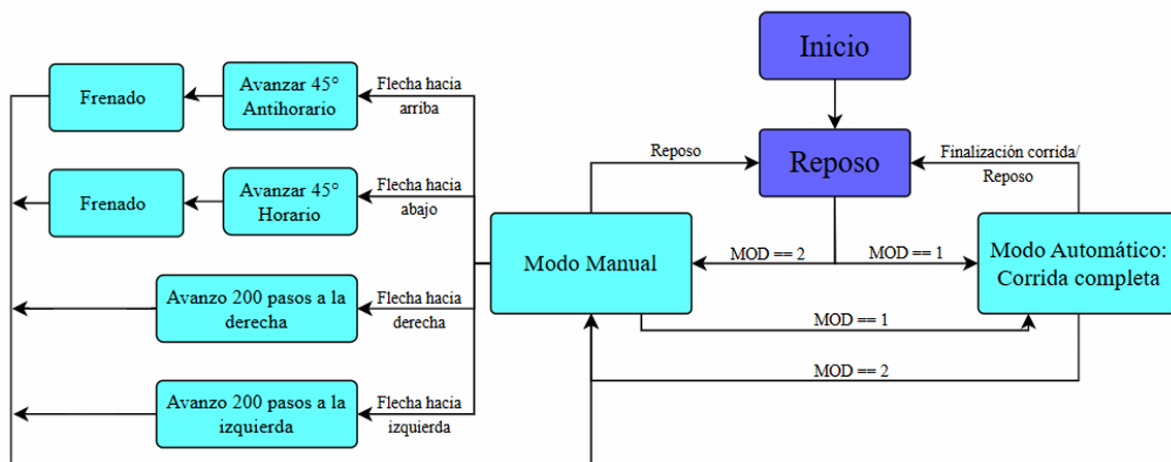


Figura 9: Lógica de funcionamiento del prototipo.

Conclusiones

Se logró diseñar, desarrollar e implementar un prototipo funcional capaz de ejecutar movimientos rotacionales y longitudinales sobre la superficie de tuberías, permitiendo automatizar la inspección requerida durante la IVD y reducir la dependencia de la intervención manual del operador. La coordinación de ambos movimientos posibilita ejecutar trayectorias controladas y repetibles, contribuyendo a mantener condiciones de escaneo más uniformes a lo largo de toda la superficie relevada.

Como se puede observar en las Figuras 10.a y 10.b, se realizaron dos inspecciones utilizando parámetros fuera de los rangos recomendados por el fabricante, con el objetivo de evidenciar el impacto que tienen las condiciones de operación sobre la calidad del relevamiento. En particular, tanto una distancia inadecuada entre el escáner y la superficie como una velocidad de desplazamiento excesiva afectan de manera significativa la reconstrucción obtenida.

En la Figura 10.a se presenta un escenario en el cual el escáner ejecuta el barrido a una altura aproximada de 15 cm respecto de la superficie, valor inferior al especificado por el fabricante (aproximadamente 25 cm). En esta condición, el escáner pierde referencia de la superficie durante la inspección, debido a que se ve afectada la triangulación y el reconocimiento de los targets. Como consecuencia, se generan zonas sin datos y discontinuidades, evidenciando una adquisición del estado de la superficie incompleta.

Por otro lado, la Figura 10.b muestra un segundo escenario en el que el sensor se desplaza a una velocidad elevada, superior a la recomendada para el modo de adquisición utilizado. Esta condición reduce la densidad de información registrada y compromete la estabilidad del seguimiento, provocando que una parte considerable de la superficie quede sin inspeccionar o con información insuficiente para reconstruir de forma continua el estado de la superficie de la tubería.

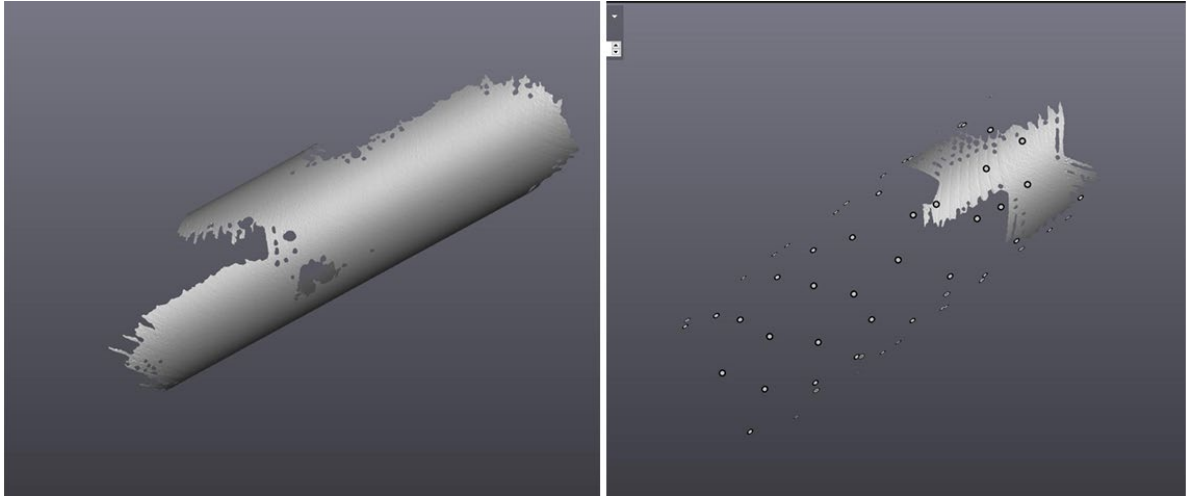


Figura 10: Resultado de escaneo 3D sobre una superficie de 8" con parámetros inadecuados; a) Resultado del escáner en zonas donde la altura es demasiado baja b) Resultado del escáner a una velocidad de desplazamiento muy elevada.

En contraste, en la Figura 11.a se muestra el prototipo ejecutando el escaneo bajo condiciones nominales de funcionamiento en términos de altura y velocidad, manteniendo una distancia adecuada y una velocidad de desplazamiento controlada. La Figura 11.b muestra el resultado obtenido de la IVD, donde se observa una correcta reconstrucción del estado de la tubería. Este resultado permite validar que el prototipo es capaz de desplazar el escáner de manera estable, cumpliendo con los lineamientos establecidos por el fabricante para obtener una reconstrucción fehaciente.



(a)

(b)

Figura 11: Resultado del escaneo utilizando el prototipo a) Prototipo montado sobre la superficie de la tubería b) Superficie escaneada de la tubería.

En términos operativos, se compararon los tiempos de preparación y las prestaciones obtenidas entre el prototipo y la inspección manual, con el objetivo de evaluar su impacto en campo. Los tiempos aproximados de ensamblaje asociados al armado del prototipo son del orden de 20 minutos, considerando el montaje del sistema sobre la tubería y la puesta a punto inicial. En comparación, para una inspección realizada de manera manual por un operador, el armado de los instrumentos y la preparación del escáner demandan aproximadamente 5 minutos. Sin embargo, aunque el prototipo requiere un mayor tiempo inicial de instalación, este se justifica por las mejoras que aporta durante la ejecución del ensayo y por las ventajas operativas respecto del método manual. En primer lugar, permite realizar la inspección manteniendo una altura y una velocidad de desplazamiento constantes, condiciones necesarias para asegurar una reconstrucción

correcta y uniforme de la superficie. En el modo manual, estas variables dependen directamente del operador y suelen presentar variaciones, lo que puede derivar en zonas con falta de datos o diferencias de calidad a lo largo del barrido. Por otro lado, al controlar la trayectoria y el avance, el prototipo minimiza la superposición de información y reduce redundancias. En una inspección manual es frecuente que el escáner recorra repetidamente sectores ya relevados debido a correcciones de movimiento o a la dificultad de mantener una guía precisa, lo que incrementa el volumen de datos sin aportar información relevante adicional. En consecuencia, el uso del prototipo contribuye a obtener registros más consistentes y a hacer más eficiente el tamaño final de los archivos generados. Adicionalmente, el sistema posibilita inspeccionar zonas de difícil acceso, donde la operación manual se ve limitada por restricciones de espacio, posturas forzadas o condiciones de trabajo poco favorables. En particular, frente a inspecciones dentro de un cateo u otros entornos confinados, el prototipo permite reducir la necesidad de permanencia del operador en el interior de un cateo, disminuyendo su exposición y aportando una mejora directa en términos de seguridad operativa.

En conjunto, estas ventajas compensan el mayor tiempo de preparación, especialmente en escenarios donde la se tiene que repetir la inspección, o donde la seguridad operativa resulta determinante. De este modo, el prototipo se presenta como una alternativa viable para mejorar la calidad del registro, optimizar el manejo de datos generados y reducir la exposición del operador en inspecciones realizadas en entornos confinados o de difícil acceso.

Bibliografía

- ASME B31 G
- ASME B31 G Modificada
- API 579-1/ASME FFS-1.
- Handyscan Technical Specifications/July 2014
- VXelements User Manual/2014

Curriculum Vitae de los autores:

Lohrengel Facundo

Ingeniero Electrónico, graduado de la Universidad Nacional del Comahue

Trayectoria:

En el año 2023 inicié mis actividades en el área de Ensayos No Destructivos (END) como pasante. Entre mis principales tareas se encuentran brindar asistencia en la ejecución y evaluación de ensayos, colaborar en la elaboración de planes de inspección y participar en el mantenimiento de los equipos utilizados en las inspecciones.

En el año 2025 comencé a desempeñarme como asistente técnico en el área de Integridad en Petromark SRL.

Cargo actual en la empresa:

Asistente técnico.

Ohara Luis

Ingeniero Electrónico, graduado de la Universidad Tecnológica Nacional

Trayectoria:

En el año 2007 inicié las actividades relacionadas con los ensayos no destructivos. Me desempeñe como Ingeniero de aplicaciones en la línea de Krautkramer y luego en la línea de Olympus Industrial, en la técnica de ultrasonido convencional, phased array y corrientes inducidas ofreciendo soluciones en el área de OIL&GAS, automotriz, aeroespacial e industrial.

El año 2018 me radique en Neuquén para desempeñarme como líder técnico en la firma Petromark SRL.

Cargo actual en la empresa:

Líder Técnico

Bertotto Mauricio

Ingeniero Mecánico, graduado de la Universidad Nacional de La Plata

Trayectoria:

En el año 20014 inicié las actividades relacionadas con los ensayos no destructivos, ocupando el puesto de representante técnico en diferentes líneas de negocio de empresa de OIL&GAS. Fueron mis funciones impartir capacitaciones y desarrollar documentos técnicos para el correcto desarrollo de las actividades de END.

El año 2019 me incorporé a Petromark SRL, ocupando el puesto de representante Técnico. Desde el año 2022 ocupo funciones como líder técnico en la firma.

Cargo actual en la empresa:

Líder Técnico