

Casos de aplicación de nuevas tecnologías de END automáticos en ductos según API 1104

Ignacio Fraile, ENOD S.R.L.

Introducción

Los métodos de Ensayos No Destructivos (END) para la calificación de soldaduras de ductos en campo, han experimentado durante los últimos años notables avances, de la mano de la automatización de los procesos y de la incorporación de nuevas tecnologías empleadas en su ejecución.

Al respecto, el código API 1104 que establece tanto los requisitos de calidad como de aceptación y rechazo de discontinuidades, viene acompañando la incorporación y empleo de tecnologías cada vez más avanzadas de Ensayos No Destructivos (END), tanto como alternativa o complemento de los métodos tradicionales de radiografía y ultrasonido.

El empleo de estas nuevas metodologías no sólo permite una mayor cobertura volumétrica del campo a explorar, sino también un registro digital permanente y por lo tanto de trazabilidad, con una marcada capacidad de detección y un dimensionamiento más preciso de defectos en soldaduras circunferenciales de ductos, tanto manuales como automáticas, conocidas también como *girth welds*. Su aplicación se ha vuelto cada vez más relevante en proyectos de ductos de gran diámetro y alta criticidad, donde se requiere alta productividad y confiabilidad en la evaluación de la calidad e integridad de las uniones soldadas.

En el campo específico de la radiografía industrial como técnica de END, se destaca su evolución, que partiendo de la radiografía convencional con película ha avanzado hacia técnicas más modernas, como la Radiografía Computarizada (CR) y la Radiografía Digital Directa (DR).

Estas tecnologías eliminan tiempos de revelado, disminuyen la exposición radiológica, mejoran la calidad de imagen y facilitan el archivo electrónico y de transmisión de resultados, en línea con la tendencia hacia sistemas de gestión digital de la integridad de ductos.

En este trabajo se describen las prácticas operativas desarrolladas y empleadas por la compañía para la aplicación de estas técnicas en nuestro país, presentando al respecto, una serie de resultados obtenidos en conocidos proyectos de pipelines construidos en nuestro país, destacando en particular tanto las ventajas como las oportunidades de mejora que presenta la aplicación de estas técnicas modernas de END.

Adicionalmente a lo apuntado, se describen las técnicas de END de ultrasonido automático, destacando en particular el avance de las mismas tanto en las técnicas de Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT como de SAUT/AUT) como de Time of Flight Difracción (TOFD), complementarias de las técnicas de END automático antes mencionadas.

Desarrollo:

La radiografía industrial o Radiographic Testing, es una técnica de Ensayo No Destructivo (END) que utiliza radiación ionizante (Rayos X o Rayos Gamma) para examinar la estructura interna de materiales y soldaduras sin dañarlos.

Las principales Modalidades de aplicación de esta técnica, son las siguientes:

- Radiografía Industrial Tradicional (RT): mediante empleo de películas de haluro de Ag reveladas químicamente.
- Radiografía Industrial Computarizada (CR): mediante el empleo de placas de P foto estimulable, complementada con el uso de scanner laser.
- Radiografía Digital Directa (DR): mediante el empleo de detectores digitales de alta resolución.
- Radiografía Digital Directa Automática (ADR): variante automatizada de la técnica anterior.

Las principales características de cada una de ellas son las siguientes:

Radiografía Industrial Tradicional (RT): Implica el despliegue de la etapas de radiografiado, revelado químico, diagnóstico, emisión del informe y archivo.

Radiografía Industrial Computarizada (CR): es una técnica de END que utiliza radiografía digital indirecta, reemplazando el uso de películas convencionales por placas de fósforo (Imaging Plates, IP).

Estas placas capturan la radiación que atraviesa el material inspeccionado, almacenando la información latente en forma de energía atrapada en los cristales de P, la que se lee digitalmente mediante un escáner láser, generando una imagen radiográfica digital de alta resolución que puede visualizarse, analizarse y archivar electrónicamente.



Figura 1, Esquema de la técnica de Radiografía Industrial Computarizadas (CR)

Sus principales ventajas consisten en:

- Elimina el uso de películas y productos químicos, reduciendo costos de insumos y generación de residuos industriales de disposición controlada.
- Mayor velocidad de procesamiento y disponibilidad inmediata de resultados.

- Reutilización de las placas de fósforo, reduciendo el costo operativo.
- Imágenes digitales de alta calidad, mediante el empleo de filtros, con la posibilidad de realizar medición de imágenes (defectos, etc).
- Integración con sistema DICONDE (Digital Imaging and Communication in Nondestructive Evaluation) y de gestión digital de trazabilidad.

Radiografía Digital Directa (DR): se trata de una Técnica de Ensayos No Destructivos (END) totalmente digital. Usa detectores digitales planos (Digital Detector Arrays/ DDA) y registra directamente la radiación transmitida a través del material inspeccionado.

La conversión de la radiación a imagen se realiza en tiempo real, ofreciendo resultados inmediatos, con alta resolución y gran eficiencia operativa.



Figura 2: Detalles de la técnica de END Radiografía Digital Directa (DR)

Su principio de funcionamiento se basa en el empleo de un haz de rayos X o gamma que atraviesan la pieza/soldadura, la que impacta directamente sobre un detector digital plano (DDA) que convierte la energía en señales eléctricas.

Dependiendo del material de los detectores empleados, se distinguen dos variantes de esta técnica: Conversión directa, con detectores de seleniuro amorfo (α -Se), que convierten la radiación directamente en carga eléctrica y luego en imágenes, y de Conversión indirecta, mediante el empleo de centelladores de yoduro de Ce (CsI) o de oxisulfuro de gadolinio (Gd_2O_2S), que convierten en primera instancia la radiación en luz visible y luego en señal eléctrica y de allí a imágenes.

Esta técnica que permite el empleo de paneles flexibles, una evolución de los detectores digitales planos empleados en la Radiografía Digital Directa (DR), que presentan estructuras delgadas, curvas, flexibles y por lo tanto adaptables a diversas geometrías.



Figura 3: paneles flexibles utilizados en la técnica de END Radiografía Digital Directa (DR)

Sus principales ventajas son las siguientes:

- Obtención inmediata de imágenes, en términos de segundos.
- Altísima resolución y rango dinámico, ideales para defectos finos con densidades variables.
- No requiere película ni productos químicos ni escáner.
- Menor exposición radiográfica (optimización de dosis).
- Integración con software de análisis y sistemas DICONDE (Digital Imaging and Communication in Nondestructive Evaluation).
- Facilidad de almacenamiento, trazabilidad y envío digital.
- Compatible con entornos de inspección automatizados o robotizados.

Radiografía Digital Directa Automática (ADR): Se trata de una variante automatizada de la técnica de DR, que incorpora sistema autónomos de inspección, como muestra a modo de ejemplo la figura 4.

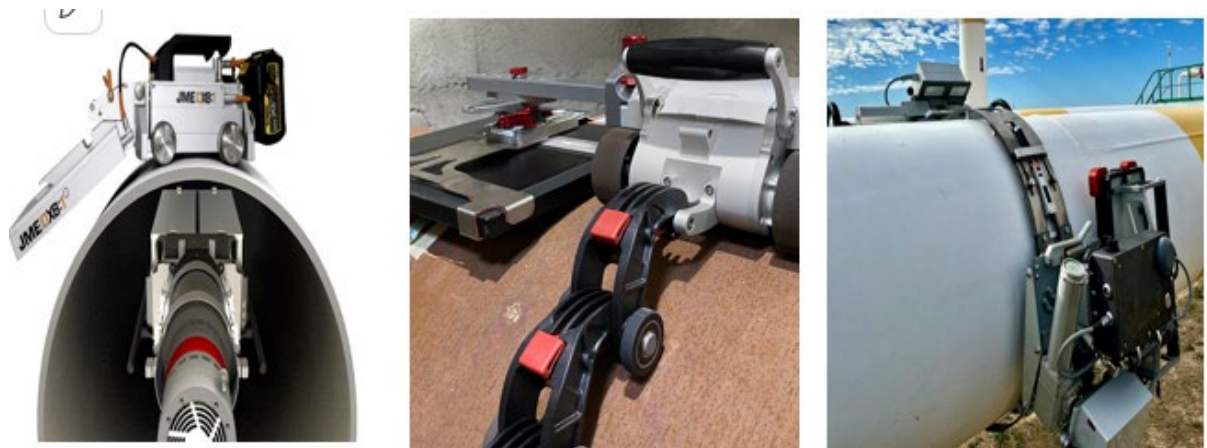


Figura 4: Detalles de la técnicas de END de Radiografía Digital Automática (ADR)

Descripción de un Caso de aplicación y comparación de empleo de las técnicas de Radiografía Tradicional (RT) y Digital Automática (ADR):

La Tabla I presenta los principales parámetros empleados en la aplicación de las técnicas mencionadas en la obra de vinculación de cañerías Ø 36" de un espesor de 14,9 mm, pertenecientes a la obra de vinculación del NEUBA 2 a PC Ordoqui, ejecutada en la Provincia de Buenos Aires en el año 2023.

Se destacan al respecto, los resultados comparativos del empleo de ambas técnicas en la obra de referencia, que, a modo de estudio de caso, pueden sintetizarse de la siguiente manera:

1. RT: Cantidad de exposiciones: 12, con un tiempo de exposición de 35 minutos por exposición, incluyendo posicionamiento/ ADR: Cantidad de adquisiciones 12, con un tiempo de exposición más adquisición de 48 segundos,
2. RT: Revelado mediante el uso de químicos. Tiempo insumido: 1 hora aproximadamente para que la placa se encuentre apta para ser analizada/ ADR: Sin necesidad de revelado, lista para evaluar en tiempo de vuelta de 15 minutos.
3. RT: Tiempo total para poder evaluar el film: 480 minutos/ ADR: Tiempo total para evaluar la imagen: 80 minutos.

Radiografía con Film	Radiografía Digital Automática
Diámetro: 36" Espesor: 14.9mm	
Fuente: Ir192 Act: 90 Ci	Fuente: Rayos X Kv: 200 mA: 4
Película exigida: D4	Equipo automatizado: Motores para el giro de detector y tubo de rayos X Computadora con software Detector Bandas del diámetro de la cañería
Cantidad de soldaduras: 4	
Técnica: Doble Pared/Simple imagen	
Cantidad de exposiciones: 12 Tiempo: 35min por exposición (incluye posicionamiento)	Cantidad de exposiciones: 1 Exposición: 8 seg Cantidad de cuadros: 5 Tiempo de adquisición: 40seg Cantidad de adquisiciones 12 Tiempo de vuelta: 15 minutos Tiempo de armado: 5 minutos
Revelado: uso de químicos Tiempo: 1 hora aproximadamente para que este apta	Sin necesidad de revelado, lista para evaluar una vez terminado el tiempo de vuelta
Tiempo total para poder evaluar el film: 480 minutos	Tiempo total para evaluar la imagen: 80 minutos

Tabla I: Variables de proceso utilizadas en los casos de Radiografía tradicional y Digital Automática.

En el estudio de caso que se presenta, para la técnica ADR se optó por usar Rayos X ya que los tiempos de exposición son mucho menores en comparación con RT empleando radiación γ , debido a la sensibilidad y la absorción del detector empleado en la técnica ADR en relación con el tipo de energía utilizada.

La comparación del mismo tipo de energía utilizando RT no es posible, ya que en el caso particular de este estudio, dados los diámetros y los espesores de la cañería examinada, sería difícil que el empleo de Rx en la RT traspasen las paredes, comprometiendo la obtención de una densidad radiográfica correcta.



Figura 2: Detalle del equipamiento utilizado para llevar adelante la técnica de END ADR en el caso que se presenta.

En el análisis de la imagen generada por ADR (Figura 3), puede observarse que la herramienta ASTM IQI 1B con 6 alambres calibrados (Indicador de Calidad de Imagen, también conocida como Penetrómetro), empleada para verificar la sensibilidad de la imagen de la técnica de END empleada, es visible en su totalidad, indicando que para el par espesor escrutado/hilo de referencia visible, se ha superado la sensibilidad requerida por la Norma API1104, como se demuestra a continuación:

$$\text{Sensibilidad (\%)} = (\text{Diámetro del hilo} \#6 \text{Espesor de la pared}) \times 100$$

$$\text{Sensibilidad (\%)} = (0.25\text{mm} \ 15\text{mm}) \times 100 = 1.67\%$$

Si bien la Norma API 1104 no es estricta con el uso del IQI Duplex (Dispositivo para medición de nitidez y resolución espacial), como alternativa del IQI Set 1B, como la norma ISO 17636-2, su empleo en el caso de la técnica ADR es aceptado como método válido para corroborar la resolución espacial básica de la imagen, imponiendo que la penumbra geométrica (Ug), es decir la falta de nitidez en los bordes de la imagen radiográfica, no sea excesiva en referencia a la técnica de doble pared, maximizando distancia fuente/objeto, y minimizando la de objeto/película.

En el caso que se expone, se utilizó el indicador IQI Duplex, que arrojó un resultado para el último par de hilos con una modulación mayor al 20% categoría D9, equivalente a un valor de resolución espacial de 130 μm , valor mínimo de visualización en la imagen.

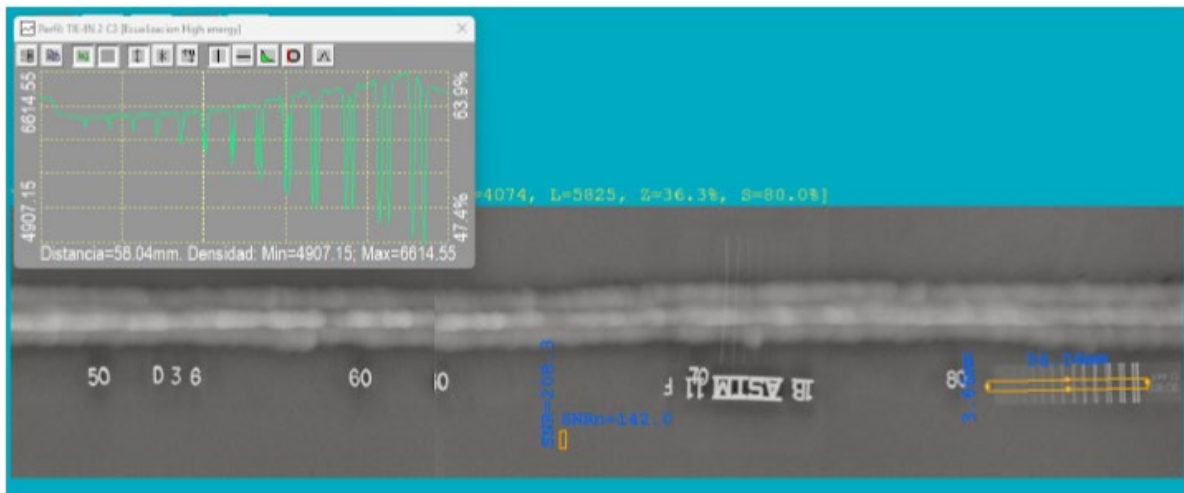


Figura 3: Registro obtenido utilizando la técnica de END de Radiografía Digital Automática.

Otros parámetro empleados para indicar que la calidad de una imagen digital es correcta son la relación señal-ruido (SNR) y la relación señal-ruido normalizada ($SNRn$), indicadores claves de la sensibilidad de contraste.

En el caso que se presenta, se utilizó este último parámetro siguiendo los lineamientos de la Norma ISO 17636-2, obteniéndose como resultado un valor de $SNRn=142$ en el material base, siendo que la Clase A (examen estándar) de la citada norma, estipula un valor mínimo de $SNRn$ de 70, medido sobre soldadura.

En ese caso, la misma norma establece que para determinaciones de $SNRn$ sobre material base, el valor mínimo debe ser multiplicado por un factor de 1.4, pasando por lo tanto a un valor de $SNRn = 98$, valor superado por los 142 medidos.

Para la Clase B (examen de alta sensibilidad) de la citada norma, se especifica un mínimo de $SNRn = 100$ (medido en soldadura) y de $SNRn = 140$ medido en material base.

Los resultados obtenidos para ambos parámetros de clase, que se presentan en la Tabla II, indican claramente que los mismos superan lo especificado por la norma de aplicación, confirmando que, tanto la técnica como los procedimientos utilizados, son congruentes con la obtención de imágenes con muy bajo nivel de ruido y una excelente capacidad de detección de defectos de bajo contraste.

Resumen final de Calidad (Normas API1104 / ISO17636-2)

Parámetro	Valor Obtenido	Requisito (Clase B / API)	Estado
Sensibilidad (Hilo)	6 (0.25 mm)	7 (0.33 mm)	Excedido
Nitidez (Duplex)	D9 (0.13 mm)	D9 o menor (según material)	Excelente
SNR Normalizada	142	> 100	Excelente

Tabla II: Resumen de los parámetros de calidad obtenidos .

Conclusiones del caso analizado

A partir de los resultados obtenidos comparando la aplicación de las técnicas de Radiografía Tradicional (RT) con Radiografía Digital Automática (ADR) aplicadas en la soldadura de una cañería Ø 36" y un espesor de 14,9 mm, de la vinculación del NEUBA 2 a PC Ordoqui, se puede concluir lo siguiente:

1. Los resultados de productividad de los métodos de END utilizados, muestra una importante disminución de los tiempos de exposición entre ambas técnicas, reduciendo los 35 minutos de la RT, a sólo 48 segundos en el caso de la ADR,
2. En lo concerniente a la generación de la información de los END comparados, la ADR no sólo elimina el uso de productos químicos y de material de las películas, sino que además disminuye el tiempo de exposición del personal involucrado, llevando los 60 minutos para que las placas de RT se encuentren aptas para ser analizada, a sólo 15 minutos.
3. En cuanto a la calidad, sensibilidad y visualización de imágenes y por lo tanto de detección de defectos, la técnica de END ADR ha demostrado ser un método superador de la RT, con imágenes con muy bajo ruido y excelente capacidad de detección de defectos.

Por último, y a modo de complemento del presente trabajo, las Tablas IV y V permiten realizar una comparativa de ventajas y desventajas de los métodos de END por radiografiado y de las modernas técnicas de Ultrasonido Convencional (UT) y Ultrasonido Automático (SAUT/AU).

Criterio	RT Convencional	CR (Radiografía Computarizada)	DR (Radiografía Directa)	DR Automática
Medio de registro	Película radiográfica.	Placa de fósforo (IP).	Detector digital plano (DDA).	Detector digital integrado en sistema automatizado.
Proceso de obtención de imagen	Exposición + Revelado químico + Visualización.	Exposición + Lectura láser + Imagen digital.	Exposición + Imagen digital inmediata.	Exposición y análisis automático en tiempo real.
Tipo de radiación	Rayos X o gamma.	Rayos X o gamma.	Principalmente rayos X.	Rayos X o gamma.
Tiempo de resultado	Horas.	Minutos.	Segundos.	Tiempo real.
Resolución de imagen	Alta (dependiente del film).	Alta (según IP y escáner).	Muy alta (resolución fija).	Muy alta.
Reutilización del medio	No reutilizable.	Reutilizable cientos de veces.	No aplica (uso continuo).	No aplica (integrado).
Almacenamiento	Físico (sobres y archivadores).	Digital (DICONDE).	Digital (DICONDE).	Digital (DICONDE).
Seguridad / Medio ambiente	Uso de químicos y residuos tóxicos.	Sin químicos, radiación controlada.	Sin químicos, baja radiación.	Sin químicos, sistema cerrado y controlado.
Productividad	Media.	Media.	Alta.	Muy alta.
Repetibilidad	Baja.	Alta.	Muy alta.	Muy Alta.
Trazabilidad / Registro digital	Limitada (física).	Completa (archivos digitales).	Completa (digital).	Completa (digital).
Costo inicial / operativo	Bajo.	Medio.	Alto.	Muy alto.
Ventajas	Alta resolución, método conocido.	Digitalización, placas reutilizables.	Rápida, trazable, sin químicos.	Máxima eficiencia, automatización total.
Limitaciones	Lenta, usa químicos y espacio físico.	Requiere escáner y limpieza de IP.	Costo inicial alto, manejo delicado.	Muy costosa, orientada a producción industrial.

Tabla IV: Resumen de ventajas/desventajas de técnicas de END radiográficas.

Criterio	UT Manual	PAUT Manual	SAUT (Semi-Automático)	AUT (Automático con Discriminación Zonal)
Definición	Método tradicional con palpador individual operado manualmente.	Uso de arreglo de elementos (array) con control electrónico del haz, barrido sectorial o lineal manual.	Combina palpadores con sistema de escaneo motorizado o guiado y registro digital.	Sistema automatizado que inspecciona zonas específicas del espesor con múltiples transductores.
Movimiento del palpador	Manual.	Manual con posible codificación.	Motorizado o guiado con encoder.	Automatizado, movimiento controlado.
Registro de datos	Limitado, no digital.	Digital (A-scan, B-scan, S-scan).	Digital completo (B-scan/C-scan).	Digital completo, trazable (B/D-scan).
Dependencia del operador	Muy alta.	Media.	Media-baja.	Baja.
Repetibilidad	Baja.	Alta.	Alta.	Muy alta.
Precisión de dimensionamiento	Moderada, depende del operador.	Alta, ideal para defectos planos.	Alta, correlación profundidad/posición.	Muy alta, por zonificación controlada.
Productividad	Baja.	Media.	Alta.	Muy alta.
Registro trazable	No.	Sí, digital.	Sí, completo.	Sí, trazable y auditable.
Nivel de automatización	Ninguno.	Parcial (electrónico).	Parcial (mecánico y electrónico).	Total (mecánico y electrónico).
Costo del sistema	Bajo.	Medio-alto.	Medio-alto.	Alto.
Aplicación típica	Inspección de campo, mantenimiento.	Soldaduras críticas, recipientes y tuberías.	Control de calidad de soldaduras en taller o campo.	Inspección automatizada de soldaduras circunferenciales (pipeline).
Ventajas	Bajo costo, portátil, simple.	Alta resolución, imágenes inmediatas.	Repetible, registro digital, trazable.	Máxima exactitud y cobertura total.
Limitaciones	Depende del operador, sin trazabilidad.	Cobertura limitada por pesada, requiere capacitación.	Calibración y preparación más compleja.	Costo y complejidad, requiere personal especializado.

Tabla V: Resumen de ventajas/desventajas de técnicas de END por ultrasonido.

Bibliografía consultada:

1. “[API STD 1104: Welding of Pipelines and Related Facilities](#)”, Edition 22, API Org.
2. “ISO 17636-2:2013: Non-destructive testing of welds - Radiographic testing”.
3. Mc Master et al.: “Nondestructive Testing Handbook”, 1st Edition, Society for Non-destructive Testing, 1959.
4. “Automated Ultrasonic Testing of Pipelines Girth Wells”, Eclipse Scientific Ed., 2nd 2013.