



La robótica en apoyo de la integridad de los tanques

Por **Rafael Rengifo** (Becht Engineering) y **Brian Kinsey** (Square Robot)

Introducción

La longevidad de la vida útil del tanque de almacenamiento sobre el suelo depende del control de calidad de su construcción inicial, así como de la puntualidad y la eficacia de las inspecciones internas y externas periódicas. En la norma API 653 Inspección, reparación, alteración y reconstrucción de tanques se describe en detalle los requisitos mínimos para el cuidado y el mantenimiento de un AST. Las evaluaciones del tanque incluyen elementos, como el espesor del fondo del tanque, el espesor mínimo restante de la placa, las evaluaciones de la boquilla, el asentamiento fuera del plano de la carcasa, el borde y el asentamiento del fondo.

Las metodologías y las técnicas de inspección tradicionales requieren que los tanques estén fuera de servicio para su preparación e inspección en un período de tiempo específico. Desafortunadamente, los métodos

tradicionales de inspección de tanques fuera de servicio basados en el tiempo interrumpen las operaciones comerciales, son reactivos, costosos y conllevan un riesgo inherente a la salud, la seguridad y el medio ambiente para poder funcionar.

Las inspecciones robóticas de tanques en línea ofrecen un enfoque mucho más proactivo para la calidad de los tanques y los programas de gestión de riesgos con una economía comercial mejorada que debe integrarse en el programa de calidad de propietarios/operadores de tanques y en las inspecciones de AST. Las inspecciones robóticas, cuando se aplican correctamente, se alinean mejor con los objetivos económicos corporativos y ESG al retirar al personal del trabajo innecesario e inseguro en espacios confinados, reducir o eliminar las emisiones de aire y productos de los tanques, mejorar la utilización y el tiempo de actividad de los tanques, extender de manera segura las fechas fuera de servicio y vida útil

La información adquirida a través de la tecnología robótica permite que las prácticas de integridad de los tanques se alineen completamente con los requisitos comerciales sin aumentar el riesgo. En este documento se debate la evolución de esta tecnología y los desafíos en la implementación de la robótica, como apoyo en la integridad de tanques.



del tanque y reduciendo el costo general de inspección y reparación.

Evolución en las prácticas de integridad de tanques

La historia del diseño de tanques y la evolución de las prácticas de mantenimiento tiene más de 150 años. Durante esos años, una secuencia de eventos basada en incidentes y las respuestas de los comités de la industria dieron forma a lo que tenemos hoy en términos de mejores prácticas y estándares para el diseño, la gestión de la integridad y el mantenimiento de tanques (Figura 1).

La Norma API 653 de Inspección, Reparación, Alteración y Reconstrucción de Tanques (1991) es un documento que solo tiene 31 años de evolución y comenzó como la respuesta del Congreso estadounidense al impacto generado por el colapso de la carcasa de un tanque reconstruido, que vertió 92 millones de barriles de

combustible diésel al río Monongahela en Pensilvania, Estados Unidos, en 1988. Este documento describe en detalle los requisitos mínimos para gestionar la integridad de los AST. Según esta norma, el incidente mencionado conocido como el “Desastre de Pittsburgh”, sentó las bases para la intención, el alcance y el enfoque de la API 653. La intención era, y sigue siendo, proporcionar orientación para establecer los requisitos mínimos para la gestión de integridad de un AST.

Obviamente, el alcance, al igual que otros documentos de gestión de integridad de equipos API, tenía elementos de monitoreo de pérdida de metal y consideraciones de vida restante, pero además de eso incluía consideraciones para reparaciones y reconstrucción. La prioridad fue, y sigue siendo, evitar las consecuencias ambientales causadas por la liberación del contenido del tanque.

El enfoque de consecuencias ambientales hace que el piso del AST sea un componente crítico, ya que las fugas

- 1860s / Wooden Tanks
- 1870s / Riveted Tanks
- 1919 / Molasses Tank Boston Tragedy
- 1936 / API 12C 1st Edition
- 1961 / API 650 1st Edition
- 1988 / Pittsburg Disaster
- 1991 / API 653 1st Edition
- 2005 / Buncefield Overfill and Fire
- 2005 / API 2350 3rd Edition
- 2009 / Bayamón Overfill and Fire
- 2012 / API 2350 4th Edition



Figura 1. Tanques en la historia: un viaje de eventos y acciones.

no pueden ser detectadas por inspección externa, y luego el acceso al piso del AST para inspección y eventuales reparaciones impulsa los intervalos de inspección interna, que ha sido una de las áreas donde más se habían producido cambios en el API-653 durante las últimas tres décadas.

Breve historia de los criterios de intervalos de inspección interna API 653

- Originalmente, API 653 requería un máximo de veinte años entre inspecciones internas y diez años si no se conocían datos de corrosión.
- Comenzó como Sección 4.4.2 Intervalos de inspección en el documento original de 1991, 1.ª edición.
- Todavía estaba en la Sección 4.4.2 de la 2.ª edición, publicada originalmente en 1995: “4.4.2.2 Cuando no se conocen las tasas de corrosión y no se dispone de una experiencia de servicio similar para determinar el espesor mínimo de la placa inferior en la siguiente inspección, el espesor real del fondo se determinará mediante inspección(es) dentro de los próximos 10 años de funcionamiento del tanque, para establecer las tasas de corrosión”.
- Los apéndices de la segunda edición también introdujeron el concepto de inspección basada en riesgos (RBI) como una alternativa a los criterios basados en el tiempo.
- La 3.ª edición de API 653 se publicó en diciembre de 2001. Se realizó una importante renumeración y reorganización.
- Fue entonces cuando se creó la Sección 6.4.2.1 y la Tabla 4.1 se renombró como Tabla 6.1; la Sección 4.4.2.2 se volvió a numerar como 6.4.2.2.
- En 6.4.1.2 se agregó una disposición para las inspecciones en servicio como: “Si la inspección interna se requiere únicamente con el fin de determinar la condición y la integridad del fondo del tanque, la inspección interna se puede realizar con el tanque en servicio, utilizando varios métodos de medición de espesores robóticos ultrasónicos y otros métodos de inspección en curso capaces de evaluar el espesor del fondo del tanque, en combinación con métodos capaces de evaluar la integridad del fondo del tanque como se describe en 4.4.1”.
- El lenguaje de la Sección 6.4.2.2 cambió en 2003:
- 6.4.2.2 Cuando no se conocen las tasas de corrosión y no se dispone de experiencia de servicio similar para estimar el espesor mínimo de la placa inferior en la siguiente inspección, el intervalo de inspección interna no debe exceder los 10 años.
- La 4.ª edición de API 653 se publicó en abril de 2009.
- Esto es cuando la Sección 6.4.2.1 se publicó por primera vez en su forma actual. Hasta este punto, API-653 se ejecutaba en paralelo con otros códigos de inspección API (510 y 570) en intervalos de inspección basados en índices de corrosión, servicio similar y RBI. Las salvaguardas en API 653 abordaron la oportunidad de mejorar el diseño inferior de un AST para la nueva fabricación y aún más relevante para las “renovaciones” durante las paradas de tanques. Una gran parte de la diferenciación de API 653 de los otros códigos de inspección y, de hecho, el mayor crédito para extender los intervalos de inspección interna fue la oportunidad de reducir las consecuencias con las barreras de prevención de liberación instaladas en componentes sin acceso mientras están en servicio.
- 6.4.2.1 El intervalo desde el servicio inicial hasta la inspección interna inicial no debe exceder los 10 años. Alternativamente, cuando se realiza una evaluación de inspección basada en riesgos (RBI) según 6.4.2.4, o una evaluación de servicio similar según el Anexo H, y el tanque tiene una de las siguientes medidas de seguridad para la prevención, detección o contención de fugas, la inspección interna inicial. El intervalo no debe exceder el intervalo máximo aplicable como se muestra a continuación (Tabla 1).

Tank Safeguard	Max. Initial Interval
i) Original nominal bottom thickness $\frac{5}{16}$ in. or greater	12 years
ii) Cathodic protection of the soil-side of the primary tank bottom per Note 1	12 years
iii) Thin-film lining of the product-side of the tank bottom per Note 2	12 years
iv) Fiberglass-reinforced lining of the product-side of the tank bottom per Note 2	13 years
v) Cathodic protection plus thin-film lining	14 years
vi) Cathodic protection plus fiberglass-reinforced lining	15 years
vii) Release prevention barrier per Note 3 (when similar service assessment performed)	20 years
viii) Release prevention barrier per Note 3 (when RBI assessment performed)	25 years
NOTE 1 For purposes of 6.4.2.1, effective cathodic protection of the soil-side of the primary tank bottom means a system installed and maintained in accordance with API 651. NOTE 2 For purposes of 6.4.2.1, lining of the product-side of the tank bottom means a lining installed, maintained and inspected in accordance with API 652. NOTE 3 For purposes of 6.4.2.1, a release prevention barrier means an under-bottom leak detection and containment system designed in accordance with API 650, Appendix I.	

Tabla 1. API 653 4.^a edición - Protección de tanques.

- API 653 4.^a edición, Anexo 2 se publicó en enero de 2012.
- Esto es cuando se introdujo por primera vez el idioma actual.
- Esta es también la primera vez que se nombra la Tabla 6.1: Protección de tanques.
- 6.4.2.1 Intervalo de inspección interna inicial.
- Los intervalos de inspección interna inicial para tanques recién construidos y/o tanques reacondicionados deben establecerse según 6.4.2.1.1 o 6.4.2.1.2.

A partir de enero de 2012:

- Los propietarios/operadores deben cumplir con estos nuevos requisitos para enero de 2017.
- 6.4.2.1.1 El intervalo desde la fecha de servicio inicial hasta la primera inspección interna no debe exceder los 10 años, a menos que un tanque tenga una o más de las medidas de seguridad para la prevención, detección, mitigación de la corrosión o contención de fugas enumeradas en la Tabla 6.1. La fecha de inspección interna inicial se basará en créditos incrementales para las salvaguardas adicionales en la Tabla 6.1 que son acumulativas (Tabla 2).

Por ejemplo, el intervalo máximo para un fondo de 1/4 pulg. que tiene una barrera de prevención de liberación y un revestimiento de fibra de vidrio se determinará de la siguiente manera:

10 años (inicial) + 5 años (revestimiento de fibra de vidrio) + 10 años (barrera de prevención de liberación) = 25 años.

- El intervalo de inspección inicial no deberá exceder los 20 años para los tanques sin una barrera de prevención de escape, o los 30 años para los tanques con una barrera de prevención de escape.
- API 653 5.^a edición se publicó en noviembre de 2014.
- Se agregaron fondos de acero inoxidable a la Tabla 6.1.
- En 2019, se agregó una asignación para fondos iniciales > 0,25 pulg.

Hitos importantes en los criterios de intervalos de inspección interna API 653:

- Volviendo al documento original de 1991, se le dio crédito al plástico reforzado con fibra (FRP) y todavía está allí.
- En 2009, se acreditó Barrera de Prevención de Libera-

Tank Safeguard	Add to Initial Interval
i. Fiberglass-reinforced lining of the product-side of the tank bottom installed per API 652.	5 yrs.
ii Installation of an internal thin-film coating as installed per API 652.	2 yrs
iii. Cathodic protection of the soil-side of the tank bottom installed, maintained and inspected per API 651.	5 yrs.
iv. Release prevention barrier installed per API 650, Annex I.	10 yrs.
v. Bottom corrosion allowance greater than 0.150 in.	(Actual corrosion allowance - 150 mils) / 15 mpy

Tabla 2. API 653 4.^a edición, Anexo 2 - Tabla 6.1 Protección de tanques.

ción (RPB), Protección Catódica (CP) y película delgada, al igual que hoy.

- Crédito para fondos de más de 0,250" otorgado en 2019.

El enfoque ambiental API 653 y el consiguiente énfasis en la reducción del riesgo de desarrollar una fuga "no contenida" del piso como un componente con acceso limitado para inspección, monitoreo y detección de fugas condujo al desarrollo de controles de ingeniería y mitigaciones para la probabilidad como la consecuencia de la falla del piso.

En cuanto a la probabilidad de mitigación de fallas, las medidas de control de la corrosión se incluyeron como recubrimientos para el lado del producto y CP para la parte inferior. En cuanto a las consecuencias de las mitigaciones de fallas, se incluyó el RPB como una forma de contener la fuga que evita el contacto con el suelo y la posible migración a cursos de agua o acuíferos.

Desde la perspectiva de la confiabilidad, el intervalo de inspección interna inicial ampliado considera las medidas de seguridad y las mejoras de diseño que existen para proteger el tanque y limitar la posibilidad de pérdida de contención. Los revestimientos brindan una barrera contra la interacción del producto con el fondo del tanque, lo que reduce las tasas de corrosión y el potencial de liberación del producto.

El fondo del tanque se puede construir con materiales resistentes a la corrosión o placas de mayor espesor, lo que puede mejorar en gran medida la longevidad del tanque, especialmente cuando se combina con sistemas de protección catódica para reducir la tasa de crecimiento de la corrosión dentro del tanque. Las barreras de prevención de liberación se instalan debajo del tanque con el fin de contener cualquier producto que pueda liberarse del fondo del tanque defectuoso y limitar el impacto ambiental en caso de que falle. Por lo tanto, aquellos tanques con tres capas de protección (revestimiento interno, fondo del tanque con protección catódica y barrera de prevención de liberación) presentan un riesgo mucho menor para el medio ambiente que la barrera simple (fondo del tanque con protección catódica).

Las mitigaciones mencionadas cumplen con objetivo de reducir el riesgo y crean la oportunidad de administrar la integridad del tanque en función del riesgo con la extensión de los intervalos de inspección interna inicial y los intervalos de inspección posteriores mediante el uso de la metodología RBI y de evaluaciones de servicios similares que reducen el número total de inspecciones internas. Cada inspección interna requiere que el tanque se apague, se drene, se someta a un extenso programa de limpieza, se inspeccione, se repare (si es necesario) y luego se vuelva a poner en servicio. Todos estos pasos quedan fuera de las operaciones diarias regulares y potencialmente pueden dañar el tanque, su equipo auxiliar, o causar exposición ambiental y/o pequeñas liberaciones de producto. Estas operaciones también exponen al personal a riesgos de salud y seguridad, ya que ingresar a los tanques (es decir, espacios confinados) para limpieza e inspecciones conlleva riesgos inherente.

La inspección solo de los tanques de mayor riesgo minimiza estas operaciones y ayuda a disminuir el riesgo para el equipo y el personal de inspección. Reducir el

número total de inspecciones de tanques, además, limita el impacto en la calidad del aire (emisiones de gases de efecto invernadero y ruido).

Desde una perspectiva de costos, se anticipa que aumentará el intervalo de inspección interna inicial promedio para tanques recién construidos, tanques existentes con un fondo recién instalado y los intervalos de inspección interna subsiguientes para "tanques de buen actor". Realizar menos inspecciones en forma anual reduce los costos de inspección para los tanques con suficientes medidas de seguridad o para aquellos con datos históricos que respalden una baja probabilidad de falla que justifique intervalos de inspección interna extendidos.

Además de los costos directos asociados con la inspección de tanques, menos interrupciones en los tanques colabora en mantener una entrega constante de productos al limitar las interrupciones y el tiempo de inactividad de los tanques. El costo-beneficio también alentará a los propietarios/usuarios de tanques a incorporar salvaguardas adicionales en el diseño de nuevos tanques y desarrollar/implementar un programa de integridad de tanques basado en el riesgo. Por lo tanto, la implementación del enfoque basado en el riesgo limitará el costo total de inspección para la flota de tanques del propietario/usuario al tiempo que minimiza las posibles interrupciones del servicio y, lo más importante, reduce la exposición a incidentes de seguridad, la generación de desechos de materiales peligrosos y las emisiones a la atmósfera.

Un programa de integridad de tanques basado en el riesgo incluye elementos de metodologías de evaluación y tecnología para recopilar y procesar datos representativos de una manera no invasiva y sin interrupciones para las operaciones del tanque. API 653 proporciona referencias para las metodologías de evaluación de RBI, y el propietario/los usuarios del tanque pueden seleccionar, desarrollar e implementar el enfoque basado en el riesgo que mejor se adapte a su caso. En cuanto a la tecnología para respaldar la recopilación de datos efectiva y eficiente, se están desarrollando inspecciones no intrusivas y exámenes no destructivos (NDE) para obtener información del piso y la superficie interna de la carcasa. Además, se realizaron inspecciones robóticas para ayudar en la recopilación de datos mediante la introducción de robots no tripulados dentro del tanque que, en muchos casos, permiten que el tanque continúe en servicio. En este punto, el propietario/usuario tiene varias opciones disponibles en la caja de herramientas para continuar optimizando sus programas de gestión de integridad del tanque.

Tendencias de la industria en métricas de confiabilidad e integridad de tanques

La tendencia de la integridad de los tanques está pasando de estar basada en la condición a estar basada en el riesgo. Mientras que los enfoques basados en la condición no consideran las diferencias como consecuencia de una falla para distintos tanques; los intervalos de los eventos de inspección se basan en el tiempo establecido arbitrariamente por reglamentos, códigos, normas o políticas de la empresa. Además, los enfoques basados en condiciones se fundan en mecanismos de degradación de tendencias que no siempre se pueden modelar de manera efectiva para producir tasas de degradación

representativas. Los enfoques de condiciones basados en el riesgo incluyen el análisis de las consecuencias más allá del evento de pérdida de contención y el análisis de la probabilidad basado en la probabilidad.

El enfoque basado en el riesgo permite que los propietarios/usuarios de los tanques identifiquen y diferencien los tanques de buenos y malos actores. La optimización de los programas de integridad para tanques de buen actor ahora está ocurriendo y muestra tendencias interesantes y prometedoras en la extensión de los intervalos de inspección interna.

Intervals for Internal Inspection	Large % of owner / users	Industry	Good Actor Optimized Scenario
Initial Maximum	10 years	10 - 20 years	Unlimited
Initial Average	9 years	12 years	Upward trend
Subsequent Maximum	20 years	25 years	Unlimited
Subsequent Average	13 years	16 years	Upward trend

Tabla 3. Tendencias de los intervalos de inspección interna.

El intervalo máximo de inspección interna “ilimitado” para los buenos actores se puede lograr en base a un programa de integridad del tanque bien desarrollado e implementado con acciones claramente definidas para diferentes etapas y partes interesadas: comienza con el diseño y la construcción de nuevos tanques con salvaguardias, sigue con la ejecución de la reconversión de los tanques existentes para incorporar mitigadores e implementar evaluaciones de riesgos respaldadas con los datos recopilados de inspecciones no intrusivas / en servicio. La tabla 4 muestra un resumen de las acciones para la optimización del programa de integridad del tanque.

Las acciones hacia la optimización requieren inversión en evaluaciones para identificar los tanques de buenos actores, pero luego los ahorros de los intervalos de inspección interna liberaron recursos para inversiones con el objetivo de diseñar y construir nuevos tanques con salvaguardas y, lo más impactante, convertir a los malos actores en buenos actores al reacondicionarlos con mitigaciones. Las inspecciones no intrusivas/en servicio basadas en NDE aplicadas externamente o inspecciones robóticas brindan la oportunidad de tener puntos

de datos sobre buenos actores para respaldar la continuidad en el servicio y tener datos sobre malos actores para desarrollar un alcance optimizado del trabajo de reparaciones antes de tomar fuera de servicio.

Muchos propietarios/usuarios de tanques están informando ahorros a corto plazo en los primeros cinco años de la implementación de programas basados en riesgos de integridad de tanques mediante la identificación de tanques de buen actor con intervalos de inspección internos extendidos al menos para el 5% de los tanques que se planearon tomar fuera de servicio. El ahorro promedio por tanque diferido se identificó en \$400 000, mientras que la inversión en la evaluación RBI del tanque por tanque diferido se identificó en alrededor del 1% de los costos de inspección y mantenimiento fuera de servicio. El costo de las inspecciones no intrusivas/en servicio basadas en NDE aplicadas externamente y las inspecciones robóticas se ha identificado alrededor del 10% de los costos de mantenimiento e inspección fuera de servicio.

Otros beneficios secundarios que los propietarios/usuarios de tanques experimentan al implementar programas basados en riesgos de integridad de tanques es una mejor comprensión del perfil de riesgo en sus flotas de tanques con la definición del rango de riesgo relativo para todos los tanques, lo que les ayuda a nivelar la carga del mantenimiento anual del tanque, al tiempo que proporciona una mayor flexibilidad operativa y comercial.

Otros beneficios intangibles son las iniciativas de optimización de la industria líder que influyen en las organizaciones y los reguladores de la industria mediante la creación de estudios de casos de gestión de riesgos que incorporan nuevas opciones tecnológicas.

Lo último en tecnología robótica para tanques y desafíos para su implementación

Impulsores de valor de inspección robótica y casos de uso

Las inspecciones robóticas en servicio pueden complementar y, en última instancia, reemplazar las inspecciones tradicionales de tanques fuera de servicio. Los casos de uso y los impulsores de valor para una inspección robótica en servicio son numerosos, como se resume a continuación.

Internal Inspection Type	Action 1 Consequences Reduction (Projects / Maintenance)	Action 2 Likelihood Reduction (Projects / Maintenance / Integrity)	Action 3 Analysis (Integrity)
Initial	- Release Prevention Barrier - Leak Detection	- Coatings (High Performance / Multipurpose) - Cathodic Protection - Non-Intrusive Internal Inspections	RBI Assessment
Subsequent	- Release Prevention Barrier - Leak Detection	- Corrosion Rate per Similar Service - Non-Intrusive Internal Inspections - Cathodic Protection Improvements - Vapor Corrosion Inhibitors - Coating (High Performance / Multipurpose)	- Similar Service - RBI Assessment 10 years RBI Re-assessments

Tabla 4. Tanques de Buen Actor – tres acciones hacia la optimización.

a. Mejor desempeño en salud, seguridad y medio ambiente

Las inspecciones típicas fuera de servicio en tanques de almacenamiento sobre el suelo requieren que el tanque se ventile, vacíe, limpie y elimine los desechos. Estas acciones crean la posibilidad de fugas y derrames y requieren muchas horas de trabajo peligrosas en espacios confinados incluso antes de que comiencen las inspecciones. En muchos casos, las inspecciones robóticas de tanques en servicio se pueden realizar sin necesidad de vaciar o limpiar el tanque, lo cual elimina la necesidad de ingresar a espacios confinados. Las emisiones son insignificantes, ya que el robot se lanza y se recupera a través de una entrada de hombre de 24" en la parte superior del tanque que nuevamente está cubierta por una placa de entrada de hombre temporal durante la inspección.

b. Información y toma de decisiones proactivas versus basadas en el tiempo

La realización de inspecciones robóticas de tanques de forma proactiva antes de las fechas planificadas de cumplimiento fuera de servicio, que son reguladas por organismos gubernamentales, brinda a los operadores propietarios varias ventajas significativas. Se adquieren datos cuantitativos y cualitativos muy valiosos del tanque con el uso de una variedad de sensores robóticos de carga útil que incluyen sensores ultrasónicos de matriz en fase, sensores de presión y temperatura, ecosondas y cámaras de video de alta resolución. Los datos de este sensor respaldan la evaluación del espesor del fondo del tanque, el asentamiento del fondo del tanque, la pared de la carcasa y los accesorios internos; la calidad del producto, los niveles de sedimentos y lodos; los recubrimientos y la efectividad del sistema de protección catódica.

Las inspecciones robóticas planificadas antes de las fechas de cumplimiento fuera de servicio brindan datos valiosos que respaldan las decisiones que mejoran o validan los programas de mantenimiento preventivo, como recubrimientos y sistemas de protección catódica, extienden las fechas de reparación fuera de servicio del tanque a años futuros, o incluso extienden las expectativas de vida útil planificadas del tanque.

Los datos de inspección adquiridos antes de las fechas planificadas de fuera de servicio por parte de la robótica, también, pueden respaldar la decisión de poner un tanque fuera de servicio para el mantenimiento y las reparaciones requeridas. Afortunadamente, esta información puede evitar una falla imprevista del tanque que obtenga el escrutinio de las partes interesadas internas y externas y dañe la reputación. Los datos proporcionados mucho antes de las reparaciones fuera de servicio pueden, en última instancia, nivelar la inspección de carga y los presupuestos de reparación, mejorar la utilización y el tiempo de inactividad del tanque, nivelar el tiempo de inactividad y la economía del tanque de carga, respaldar la cadena de suministro proactiva frente a la reactiva y la gestión de materiales para las reparaciones.

c. API 653, EEMUA 159 e informes de inspección basados en riesgos

Las inspecciones robóticas proporcionan datos críticos para respaldar los informes API 653, EEMUA 159 o RBI como parte del programa de calidad de un operador y los requisitos de cumplimiento normativo. El objetivo principal es garantizar la integridad del tanque durante su futuro estado operativo a través de una minuciosa inspección externa e interna. Las inspecciones externas deben incluir una inspección visual, un análisis del espesor



de la carcasa con el empleo de pruebas ultrasónicas, así como una inspección de la protección catódica. Además de la inspección externa, se debe realizar una inspección interna del tanque, principalmente para evaluar la integridad del fondo del tanque. La frecuencia de las inspecciones se basará en el historial del tanque en servicio, sus índices de corrosión y el tipo de inspección considerada.

d. Asentamiento del fondo del tanque

El asentamiento, generalmente, es causado por el movimiento del suelo y la creación de vacíos que no pueden soportar la carga combinada del fondo del tanque, la cubierta, el techo y el producto. La construcción inicial de los cimientos enfatiza la importancia de la condición y consolidación del suelo para evitar el asentamiento de los cimientos. Sin embargo, factores como los cambios climáticos extremos, la proximidad de la vegetación o las vibraciones del tráfico aún pueden afectar un tanque bien construido. En todos los escenarios es importante monitorear el asentamiento del fondo del tanque porque, si las condiciones se consideran inaceptables y se requiere volver a nivelar, es mejor detectarlo cuando se pueden utilizar técnicas de reparación localizadas en lugar de levantar completamente la carcasa y el fondo del tanque. Programar estudios regulares de asentamientos permitirá al propietario del tanque detectar asentamientos antes de que se vuelvan drásticamente excesivos. Las reparaciones detectadas a tiempo pueden evitarse, si el problema se puede resolver con tratamientos del suelo. El monitoreo constante de los asentamientos podrá identificar cuándo es necesario tomar medidas e, idealmente, el programa de monitoreo puede proporcionar suficientes datos de elevación para permitir un análisis estructural riguroso si se considera necesario. Los levantamientos robóticos proporcionan una alta concentración de datos de elevación utilizables para análisis posteriores.

Se pueden adquirir tres estudios de asentamiento del fondo del tanque fuera de servicio que se usan comúnmente con robots de la Generación II para medir con precisión la elevación del fondo del tanque en condiciones de carga completa mientras se mantiene el activo del tanque en servicio:

- Medición del asentamiento de la lámina en la proyección del borde.
- Medición del asentamiento del fondo.
- Medición del asentamiento de borde.

Descripción general de la inspección robótica de tanques

a. Robots de primera generación

Los robots de primera generación han estado disponibles durante varios años para realizar inspecciones internas de tanques de almacenamiento sobre el suelo. Por lo general, son robots de tipo “sobre orugas” que se alimentan y operan a través de un cable umbilical blindado de 3” a 4” que conecta el robot con una estación de control justo fuera del tanque. El robot y el umbilical, generalmente, se purgan y presurizan con nitrógeno seco para proteger la energía del producto y los vapores dentro del tanque.

Los robots que se activan y alimentan desde el exterior del tanque a través de un umbilical deben estar debidamente certificados para funcionar en entornos de

Clase 1, División 1, donde existen concentraciones inflamables de gases o vapores inflamables en condiciones normales de funcionamiento. Es posible que también se requieran precauciones y procedimientos de seguridad adicionales.

Navegar alrededor de las obstrucciones y proporcionar la máxima cobertura de inspección del fondo del tanque puede resultar un desafío para los robots de primera generación, ya que son conducidos por técnicos ubicados en la estación de control de apoyo y deben manejar un umbilical relativamente grande y pesado, que se encuentra predominantemente en el piso inferior del tanque.

Los robots de primera generación, habitualmente, dependen de su transmisión de video para navegar y orientar el robot. Otros también están equipados con un sonar de imágenes para realizar escaneos tridimensionales que respaldan la navegación y la evitación de obstáculos cuando los sedimentos del fondo del tanque impiden que las cámaras a bordo reciban imágenes claras. Independientemente, la navegación y la cobertura resultan ser un gran desafío en tanques de productos con poca visibilidad y sedimentos.

Estos robots, generalmente, están equipados con sensores NDT que incluyen fuga de flujo magnético (MFL), pruebas ultrasónicas, cámaras de video o una combinación de estos sensores. La calidad de los datos de MFL puede resultar bastante desafiante en tanques que incluyen materiales ferrosos y metales como parte de los sedimentos y lodos típicos que se ven en los fondos de los tanques.

b. Robots de segunda generación

Los robots de segunda generación incluyen robots flotantes y nadadores que son capaces de navegar de forma autónoma alrededor o sobre obstrucciones dentro del tanque para proporcionar una cobertura interna más amplia del tanque de manera segura. Estos robots autónomos se energizan y controlan en el robot y solo se usa una correa de comunicaciones de fibra óptica de un cuarto de pulgada de diámetro no energizada para monitorear el robot desde un remolque móvil externo. Estos robots miden el fondo del tanque y el espesor de la placa anular de los AST llenos de agua y productos de alto punto de inflamación, incluidos diésel, combustible para aviones, queroseno, destilados o productos químicos y refinados similares.

Los robots de segunda generación deben estar certificados para operar en los entornos de tanques y productos específicos para ubicaciones peligrosas de Clase 1, División 2, Grupo D. Los datos de las pruebas no destructivas (END) del robot deben calificarse de acuerdo con API 653 Anexo G u otras normas reconocidas.

Los robots de segunda generación actualmente están equipados con la capacidad de combinar pruebas ultrasónicas de matriz en fase (PAUT) o corriente de Foucault pulsada (PEC) con dos cámaras de video de alta definición. La primera cámara, generalmente, se orienta hacia la carga útil de NDT seleccionada, mientras que la otra se enfoca hacia el exterior del tanque y sus accesorios. La plataforma robótica autónoma y la clasificación C1D2 deberían facilitar el desarrollo y la entrega de futuras cargas útiles que admitan aplicaciones internas de END, limpieza y reparación de tanques.

- **Transductores ultrasónicos de matriz en fase (PAUT)**

Los robots de segunda generación están equipados con un paquete de sensores de pruebas ultrasónicas Phased Array de 12" y 256 elementos que proporciona espesor del fondo del tanque de alta resolución, datos de tamaño de defectos y puede diferenciar entre defectos y corrosión del lado del suelo y del lado del producto. Curiosamente, PAUT también se puede utilizar para cuantificar y validar el espesor del recubrimiento. Estos sensores y los paquetes de procesamiento de datos asociados pueden obtener aproximadamente 18.000 puntos de datos UT en una sección de un pie cuadrado (900 cm²) y los robots están diseñados teniendo en cuenta una cobertura óptima, que permite obtener datos dentro de ½" (6 mm) de la carcasa del tanque y muchas anexidades.

- **Matriz de corriente de Foucault pulsada (PECA)**

Los robots de segunda generación también pueden estar equipados con una matriz de corriente de Foucault pulsada de siete elementos que utiliza tecnología avanzada de inspección electromagnética para detectar fallas y corrosión en materiales ferromagnéticos. Proporciona mapas de corrosión que se pueden recopilar en entornos menos adecuados para PAUT, incluidos recubrimientos muy gruesos.

- **Cámaras de Alta Definición para Inspección Visual**

Los robots de primera y segunda generación suelen estar equipados con cámaras de alta definición que han evolucionado significativamente en los últimos años. Las cámaras de alta resolución orientadas hacia adelante y hacia abajo y los paquetes de iluminación se pueden ejecutar de forma independiente o junto con inspecciones NDT para proporcionar datos cualitativos de apoyo. Los robots de segunda generación pueden nadar, flotar y navegar de forma autónoma alrededor de obstáculos para respaldar imágenes visuales tanto del sensor NDT como enfocadas hacia afuera en la elevación para inspeccionar la calidad del producto, las boquillas, las tuberías, las válvulas, las columnas u otros accesorios. Las imágenes de video brindan retroalimentación en tiempo real al operador del robot y también se combinan con datos posprocesados para hacer una referencia cruzada con los datos NDT disponibles.

- **Sistemas de Gestión de Sedimentos**

Los robots a menudo están equipados con sistemas de gestión de sedimentos que son consideraciones importantes, ya que deben alejar los sedimentos de manera efectiva para proporcionar un fondo de tanque más limpio antes del sensor NDT seleccionado. El sistema puede configurarse para que sea efectivo en una variedad de diferentes tipos de sedimentos y debe diseñarse para evitar el daño de recubrimientos valiosos.

Criterios de selección de tanques y consideraciones operativas

Los propietarios y operadores de tanques deben comprometerse con los proveedores de servicios de inspec-

ción robótica tan pronto como sea posible en su proceso de selección de tanques para respaldar la detección de tanques y las operaciones exitosas que, en última instancia, conducirán a los resultados de informes deseados. El conocimiento y la experiencia compartidos son fundamentales para optimizar la robótica como parte de la calidad del operador, el programa de integridad de activos y el programa de inspección de tanques. Se puede crear un valor significativo al revisar las prioridades de inspección de tanques individuales y los resultados en el contexto de las prioridades comerciales del operador.

El equipo del cliente/proveedor debe trabajar en conjunto para determinar los tanques de "buen actor" que mejor se adapten a los objetivos del cliente en el contexto de las capacidades del robot y las consideraciones de seguridad.

1. Los requisitos reglamentarios, generalmente, se remiten a API 653 o pautas similares que sí aprueban las inspecciones robóticas como método de inspección. Las pautas deben seguir abordándose y actualizándose en el contexto de las capacidades robóticas en rápida evolución y los niveles de confianza posteriores más altos que ahora se están logrando y observando.
2. Los objetivos y requisitos de inspección deben considerarse como parte del proceso de selección. El equipo debe comprender completamente si el robot especificado y los datos resultantes disponibles respaldarán completamente los requisitos del cliente.
 - a. Metodología de inspección y nivel de calidad respaldados por datos cuantitativos o cualitativos disponibles
 - b. Los requisitos de cobertura de inspección deben considerarse dada la condición percibida del tanque y la capacidad de inspección robótica.
 - c. Espesor del Fondo del Tanque - Zona Crítica y Cobertura de la Placa.
 - d. La calidad del recubrimiento se puede observar cualitativamente usando cámaras de alta definición para observar ampollas, espacios y fallas. Los sensores NDT ahora disponibles en robots también pueden proporcionar una medición cuantitativa del espesor del recubrimiento.
 - e. La calidad del producto se puede observar cualitativamente con videos de alta definición en robots flotantes autónomos, ya que pueden cubrir todo el tanque.
 - f. El asentamiento del fondo del tanque en condiciones de tanque completamente cargado se puede obtener mediante inspecciones internas por robótica.
 - g. El mapeo de sedimentos se puede obtener mediante robots flotantes autónomos y podría usarse como una herramienta de preselección antes de inspecciones robóticas más completas durante la misma campaña de inspección o para planificar futuras fechas de inspección. El mapeo de sedimentos también puede ser útil para establecer el volumen de almacenamiento del tanque o planificar y establecer una línea de base para los servicios de limpieza de sedimentos/lodos.
 - h. Las inspecciones visuales proporcionan datos cualitativos importantes, incluida la calidad del producto, el estado del revestimiento, el estado del fondo

del tanque y la integridad estructural.

- i. Las inspecciones de sellos de anillos primarios o secundarios pueden ser más compatibles con las inspecciones robóticas en un futuro próximo.
 - j. Se pueden proporcionar actualizaciones de dibujos de tanques digitales y/o gemelos digitales a través de la robótica.
3. Los objetivos comerciales y económicos están más respaldados por la robótica, ya que brindan métodos más rentables y flexibles para administrar el riesgo de manera proactiva al tiempo que mejoran la utilización del tanque y prolongan la vida útil del tanque. El equipo debe destacar las inspecciones robóticas en tanques específicos, fundamentales para los procesos o el valor comercial del material. Las inspecciones se pueden planificar entre levantamientos comerciales y respaldar programas de mantenimiento proactivo que, en última instancia, evitan la pérdida imprevista de un tanque en un momento crítico.
 4. La edad del tanque o del fondo del tanque y la condición percibida son consideraciones importantes que se pueden usar para determinar la probabilidad de que el tanque deba ser puesto fuera de servicio para las reparaciones o el reemplazo necesarios del fondo del tanque. Las inspecciones robóticas son ideales para proporcionar los datos necesarios para el grosor de la placa de referencia y extender el costo y el riesgo de una fecha fuera de servicio a otro momento en el futuro. Es importante destacar que los datos de inspección robótica adquiridos también respaldan la gestión de la cadena de suministro justo a tiempo que debería reducir el costo y los días fuera de servicio necesarios para las reparaciones.
 5. El nivel y la consistencia de los sedimentos y lodos generalmente no se conocen ni comprenden bien antes de la inspección o durante el ejercicio de revisión del tanque. El historial del tanque y del producto, la fuente del producto y los procesos adyacentes pueden proporcionar pistas. El personal de campo con un largo historial en las instalaciones de tanques suele ser un recurso muy valioso para obtener esta información.
 6. La configuración del tanque, incluido el tamaño de la boca de acceso, el acceso a la boca de acceso y los accesorios potenciales dentro y fuera del tanque, debe revisarse durante el proceso de selección del tanque. En muchos casos, el acceso puede lograrse de manera segura y rentable mediante modificaciones del tanque o procedimientos de elevación. Las obstrucciones internas que impiden el acceso del robot o de inspección pueden ser más difíciles de mitigar sin poner el tanque fuera de servicio.
 7. El tipo de producto del tanque en el momento de la inspección (punto de inflamación, compatibilidad de materiales, viscosidad, temperatura) debe considerarse en contexto con la capacidad y las clasificaciones del sistema de robot. Las temperaturas de proceso y ambiente pueden cambiar con el tiempo y deben validarse antes de la inspección robótica si es posible que aumenten por encima de la clasificación del robot.
 8. Una vez que los tanques son examinados, se debe considerar un programa de inspección robótica que in-

cluya objetivos de inspección y comerciales, luego se debe considerar el programa de inspección completo.

El proceso de selección del tanque y la planificación de la inspección final generalmente deben incluir la finalización de un cuestionario del tanque, los dibujos más recientes del tanque y los informes de inspección anteriores o el historial del tanque. Estos documentos deben usarse para evaluar los tanques candidatos y luego para planificar operaciones seguras y exitosas que conduzcan a informes de inspección precisos y de alta calidad.

Los dibujos del tanque se utilizan para planificar previamente las misiones del robot antes del trabajo de inspección para navegar de manera segura alrededor o por encima de las zonas de exclusión, incluidas las columnas, los sumideros, las líneas de succión, los serpentes de calentamiento, los mezcladores y las boquillas. Los tanques aún pueden ser inspeccionados de manera segura y exitosa por robots de segunda generación sin dibujos precisos del tanque, ya que sus ecosondas a bordo y la capacidad de navegación validan el plan previo y luego pueden actualizar y adaptar la nueva información descubierta una vez en el tanque a sus planes de misión finales.

Conclusiones

La implementación de programas basados en el riesgo de integridad de tanques con el objetivo de identificar los tanques de buenos actores es fundamental para confirmar la disponibilidad instantánea y liberar recursos, con el fin de aprovechar la inversión necesaria en eliminar los tanques de malos actores.

La identificación de tanques candidatos para la tecnología robótica es importante, ya que apoya la continuidad en el servicio de los tanques de buenos actores, nivela los programas y presupuestos de inspección y reparación de carga, y optimiza las reparaciones en los tanques de malos actores.

La participación activa en comunidades de conocimiento y comités de estándares de integridad de tanques es una forma proactiva y efectiva de influir en la evolución de las regulaciones basadas en los últimos avances tecnológicos.

Referencias

- Estándar API 653 Inspección, reparación, alteración y reconstrucción de tanques. 1991. Primera edición.
- Norma API 653 Inspección, reparación, alteración y reconstrucción de tanques. 1995. Segunda edición.
- Norma API 653 Inspección, reparación, alteración y reconstrucción de tanques. 2001. Tercera edición.
- Norma API 653 Inspección, reparación, alteración y reconstrucción de tanques. 2009. Cuarta edición.
- Estándar API 653 Inspección, reparación, alteración y reconstrucción de tanques. 2009. Cuarta edición, 2012 Anexo 2.
- Norma API 653 Inspección, reparación, alteración y reconstrucción de tanques. 2014. Quinta edición.
- EEMUA 159.