



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



INSPECCIÓN INTELIGENTE DE RECIPIENTES A PRESIÓN PARA HIDRÓGENO: EFICIENCIA OPERATIVA Y GESTIÓN DE RIESGOS MEDIANTE EL USO DE DRONES

JUAN ANDRES REVEREND LIZCANO

Calle 55 A sur No 64-02 int 61

E. Mail: jreverend@hotmail.com

Bogotá. – Colombia

TABLA DE CONTENIDO

1. Resumen
2. Marco Normativo
 - 2.1 ASME SEC VII Div 3 (2025)
 - 2.2 API 510
 - 2.3 Normativa emergente para inspección con drones
3. Alcance de las Inspecciones
 - 3.1 Tipos de recipientes inspeccionados
 - 3.2 Métodos visuales y ultrasónicos
 - 3.3 Aplicación en fabricación y servicio
4. Inspecciones en Fabricación
 - 4.1 Tabla comparativa: método tradicional vs drones
 - 4.2 Gráfico de barras comparativo
 - 4.3 Evidencia fotográfica
5. Inspecciones en Servicio
 - 5.1 Tabla comparativa: método tradicional vs drones
 - 5.2 Gráfico de radar comparativo
 - 5.3 Evidencia fotográfica
6. Panel Resumen Visual
 - 6.1 Tabla de mejoras por componente
 - 6.2 Indicadores clave de desempeño (KPI)
7. Comparación Técnica de Recipientes para Hidrógeno
 - 7.1 Tabla comparativa: gaseoso vs líquido
 - 7.2 Gráfico de barras comparativo
 - 7.3 Análisis de riesgos operativos
 - 7.3.1 Deterioro de soldaduras
 - 7.3.2 Deterioro del material base
 - 7.3.3 Deterioro de recubrimientos
8. Plan de Inspección Basado en Riesgos
 - 8.1 Tipos de inspección y métodos aplicados
 - 8.2 Parámetros críticos a evaluar
 - 8.3 Procedimiento general
9. Programa de Inspección Anual
 - 9.1 Frecuencias por tipo de recipiente
 - 9.2 Actividades técnicas programadas
10. Matriz de Criticidad Técnica

- 10.1 Hidrógeno gaseoso
- 10.2 Hidrógeno líquido
11. Matriz de Priorización de Inspecciones
 - 11.1 Criterios de evaluación
 - 11.2 Asignación de prioridad por componente
12. Conclusiones y Recomendaciones
 - 12.1 Beneficios operativos del uso de drones
 - 12.2 Recomendaciones técnicas y normativas
13. Referencias Técnicas
 - 13.1 Normas ASME y API
 - 13.2 Fuentes visuales y gráficas
 - 13.3 Documentación complementaria

1. Resumen

La inspección de recipientes a presión para hidrógeno representa un desafío técnico y normativo de alta exigencia, especialmente bajo los lineamientos de ASME SEC VII Div 3 (2025) y API 510. En este contexto, el uso de drones equipados con cámaras de alta resolución y sensores ultrasónicos ha emergido como una solución eficiente, segura y trazable para realizar inspecciones internas sin necesidad de intervención humana directa. Este trabajo analiza comparativamente los métodos tradicionales frente a las inspecciones con drones, destacando mejoras en acceso, seguridad, tiempo de ejecución y compatibilidad con mantenimiento predictivo.

El análisis integral de riesgos operativos en recipientes a presión para hidrógeno ha revelado diferencias significativas entre los sistemas de almacenamiento gaseoso y líquido. Los recipientes para hidrógeno gaseoso presentan riesgos elevados por presión cíclica, fragilización por hidrógeno y deterioro de soldaduras, mientras que los recipientes criogénicos enfrentan desafíos térmicos extremos, condensación externa y fragilización estructural.

La matriz de criticidad técnica y el programa de inspección anual permiten establecer una priorización clara de actividades, donde las inspecciones de soldaduras, espesores y recubrimientos externos se



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



posicionan como tareas de alta prioridad. Este enfoque garantiza la integridad operativa, la seguridad del personal y el cumplimiento normativo, optimizando los recursos de mantenimiento y extendiendo la vida útil de los equipos.

2. Marco normativo

2.1 ASME Sección VIII Div- 3

La ASME Sección VIII División 3 (2025) establece los requisitos para el diseño, fabricación e inspección de recipientes a presión de alta exigencia, garantizando que materiales, espesores y procedimientos de soldadura soporten presiones superiores a 345 bar, mientras que las inspecciones deben ejecutarse conforme a la ASME Sección V, mediante métodos visuales y ultrasónicos regulados por los artículos KE-100, KE-102, KE-106 y KE-112, los cuales exigen personal certificado según el Artículo 1, T-120; adicionalmente, la norma admite métodos END no convencionales incluyendo inspecciones remotas con drones siempre que demuestren competencia técnica equivalente y cuenten con procedimientos calificados, registros trazables y personal certificado, integrándose plenamente al marco normativo para recipientes destinados al almacenamiento de hidrógeno.

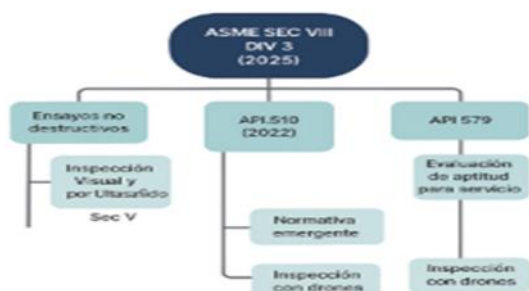


Fig. 1 Alcance normativo

2.2 API 510 (2022)

La API 510 establece el marco técnico para la inspección, reparación y reclasificación de recipientes a presión en servicio construidos bajo ASME VIII Div. 1 y 2, pudiendo extenderse a equipos de Div. 3 en aplicaciones de hidrógeno, definiendo frecuencias de

inspección, criterios de reparación y requisitos documentales, complementados por API 572 y API 571 para procedimientos y mecanismos de daño, respectivamente; en paralelo, API 579-1 / ASME FFS-1 proporciona la metodología para evaluar la aptitud para el servicio ante deterioros como fatiga, corrosión o fragilización por hidrógeno, apoyándose en los datos de diseño original y en los resultados de inspección para determinar la continuidad operativa o la necesidad de reparación; finalmente, la normativa emergente para inspección con drones integra requisitos aeronáuticos con estándares industriales, habilitando inspecciones internas y externas más seguras y eficientes, en línea con precedentes como API 653, y exigiendo considerar compatibilidad técnica, cumplimiento regulatorio y análisis costo-beneficio frente a métodos convencionales.

Secuencia Normativa a lo largo del Ciclo de Vida del Recipiente



Fig. 2 Secuencia normativa en la vida del recipiente.

2.3 Normativa emergente para inspección con drones

La inspección industrial con drones está regulada por normativas que exigen certificación del piloto, registro del equipo y operación dentro de categorías de riesgo, junto con requisitos como seguros y límites operativos. Entidades como EASA y la Aerocivil complementan estas reglas con una planificación que incluye evaluación de riesgos, permisos, control climático y operación dentro del campo visual para garantizar seguridad y eficiencia. Paralelamente, drones con cámaras RGB, térmicas y teleobjetivos permiten detectar anomalías estructurales, aunque las inspecciones internas pueden requerir autorizaciones



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



adicionales. En recipientes a presión, estas regulaciones deben integrarse con estándares como API 510 y API 579 para asegurar tanto la seguridad del vuelo como la integridad técnica, en un marco que evoluciona con la tecnología y demanda análisis costo-beneficio que respalde su adopción.

3. Alcance de las inspecciones.

De acuerdo con lo anterior, la ventana de oportunidad para la inspección con drones se enfoca por el momento en inspecciones de tipo visual y de ultrasonido para toma de espesores.

El estudio abarca recipientes cilíndricos y esféricos utilizados para almacenamiento de hidrógeno, tanto en fase gaseosa como líquida. Se evalúan inspecciones internas mediante drones equipados con cámaras HD y sensores ultrasónicos, aplicables en etapas de fabricación, puesta en marcha y operación continua, con énfasis en zonas de difícil acceso y condiciones de riesgo.

3.1 Tipos de recipientes inspeccionados

Los recipientes a ser inspeccionados son recipientes a presión para el servicio de hidrógeno en estado líquido o gaseoso, la inspección de los recipientes se divide en interna y externa según el requisito a cumplir y las limitaciones de seguridad, tiempo y logística, todas ellas deben estar enmarcadas en los alcances técnicos requeridos y de los criterios de aceptación acordados con el dueño u operador del equipo.

3.2 Métodos visuales y ultrasónicos

La ASME Sección V establece los requisitos para ensayos no destructivos en recipientes a presión, incluyendo certificación del personal y uso de equipos autorizados para inspección visual y ultrasonido. Con drones, la inspección visual se realiza mediante sistemas ópticos de alta resolución que permiten registrar información en zonas de difícil acceso, manteniendo la estructura de competencias por niveles, donde el piloto debe estar certificado y el inspector nivel 2 interpreta los datos mediante software especializado. En ultrasonido, la certificación por niveles sigue

siendo obligatoria; mientras la técnica manual requiere contacto directo, los drones pueden integrar sistemas pulso-eco con acoplante para mediciones en áreas críticas. Los avances hacia PAUT y el uso de anclajes electromagnéticos permiten estabilizar el dron y ejecutar inspecciones remotas alineadas con los requisitos de ASME Sección V.

3.3 Aplicación en fabricación y servicio

El alcance de la inspección varía según la etapa del recipiente; durante la fabricación predominan las inspecciones visuales integradas al ITP y se define un porcentaje de ultrasonido acordado entre fabricante y cliente, desarrollando planes específicos cuando se identifican zonas críticas en recipientes para hidrógeno. En servicio, las inspecciones se ejecutan conforme a planes basados en riesgo y a las ventanas operativas de los equipos en producción.

4. Inspecciones en Fabricación

El uso de drones durante la fabricación de recipientes a presión permite verificar la geometría interna, evaluar soldaduras y registrar condiciones iniciales sin intervención directa, incrementando la seguridad y reduciendo tiempos frente a métodos tradicionales. Estas capacidades abarcan la inspección previa al cierre, el control de calidad interno y la generación de registros digitales estructurados, cuyos beneficios pueden demostrarse mediante análisis comparativos con soporte en tablas y gráficos técnicos.

4.1 Tabla comparativa: método tradicional vs drones

Aspecto	Método Tradicional	Inspección con Drones
Acceso a zonas internas	Requiere apertura o inspección manual	Acceso remoto sin desmontaje
Seguridad del personal	Riesgo por espacios confinados	Eliminación de ingreso humano
Registro visual	Fotografía manual limitada	Captura HD y video en tiempo real
Verificación de soldaduras	Manual con baroscopios o inspección directa	Cámara de alta resolución + algoritmos de detección



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



Aspecto	Método Tradicional	Inspección con Drones
Trazabilidad documental	Manual, dependiente del inspector	Digital, con georreferenciación y timestamp automático
Tiempo de inspección	Alto (requiere preparación y acceso físico)	Bajo (vuelo automatizado y análisis rápido)

Tabla I Comparativo método tradicional VS drones.

4.2 Gráfico de barras comparativo

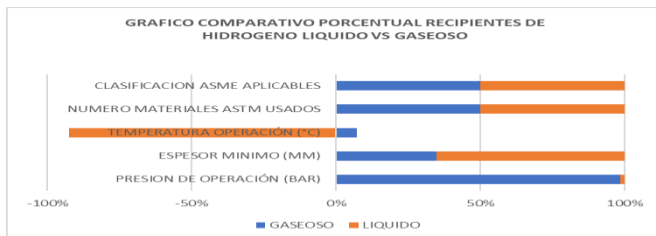


Fig. 3 Aspectos a evaluar en recipientes para hidrogeno.

4.3 Evidencia fotográfica

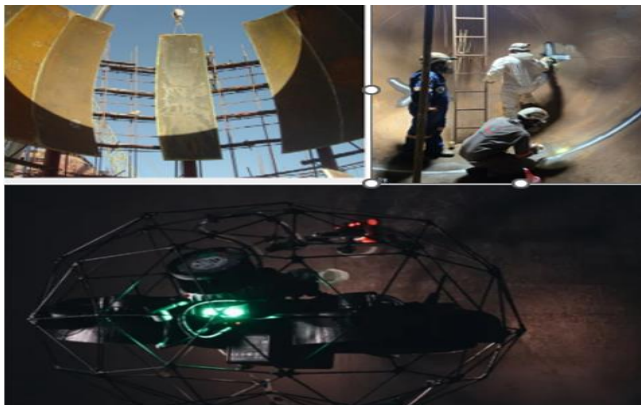


Fig. 4 inspecciones internas etapas de fabricación

5. Inspecciones en Servicio

En operación, los drones facilitan inspecciones periódicas sin despresurización completa, permitiendo detectar corrosión, pérdida de espesor y fallas estructurales. El análisis comparativo mediante tabla y gráfico de radar evidencia una mejora significativa en frecuencia, cobertura y compatibilidad con mantenimiento predictivo.

5.1 Tabla comparativa: método tradicional vs drones

Tabla 2: Inspección en Servicio – Método Tradicional vs Drones

Aspecto	Método Tradicional	Inspección con Drones
Parada de operación	Requiere despresurización y apertura	Posible inspección parcial sin parada
Evaluación de corrosión	Medición manual por puntos	Mapeo completo con sensores de ultrasonido
Costos operativos	Altos por logística y tiempo	Reducción significativa
Frecuencia de inspección	Limitada por complejidad	Mayor frecuencia por facilidad operativa
Integración con mantenimiento	Manual, dependiente de informes	Compatible con sistemas predictivos y bases de datos
Riesgo de error humano	Alto	Bajo, por automatización y repetibilidad

Tabla II comparativo método tradicional VS drones

Gráfico 2: Inspección en Servicio – Tradicional vs Drones

El gráfico de radar compara la eficiencia en servicio, destacando la superioridad de los drones en reducción de paradas, integración con mantenimiento y menor riesgo humano.

5.2 Gráfico de radar comparativo



Fig. 5 comparativos métodos de inspección

5.3 Evidencia fotográfica



Fig 6. Inspección interna de soldaduras con dron



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



6. Panel Resumen Visual

Se consolidan los hallazgos en una tabla visual que resume las mejoras por componente, destacando la superioridad del enfoque con drones en acceso, seguridad, trazabilidad y eficiencia. Además, se definen indicadores clave de desempeño (KPI) para monitorear la efectividad del programa de inspección

6.1 Tabla de mejoras por componente

Categoría	Aspecto Evaluado	Mejora con Drones
	Fabricación Acceso interno	✓ Remoto sin desmontaje
	Seguridad del personal	✓ Sin ingreso humano
	Registro visual	✓ HD + video
	Verificación de soldaduras	✓ Algoritmos + cámara
	Trazabilidad documental	✓ Digital y georreferenciada
	Tiempo de inspección	✓ Reducción significativa

Tabla III inspección con drones, mejoras comparativas

6.2 Indicadores de desempeño (KPI)

Indicador	Meta
% de zonas inspeccionadas	≥ 95%
Tiempo promedio de inspección	≤ 2 horas por recipiente
Incidencias detectadas	≤ 2 por trimestre
Cumplimiento normativo	100%

Tabla IV indicadores de desempeño

7. Comparación Técnica de Recipientes para Hidrógeno

Se presenta una tabla comparativa entre recipientes para hidrógeno gaseoso y líquido, considerando presión máxima, espesor mínimo y materiales según ASTM y ASME Sección II. Un gráfico de barras refuerza visualmente las diferencias, mientras que el análisis de riesgos identifica vulnerabilidades específicas por tipo de almacenamiento.

7.1 Tabla comparativa: gaseoso vs líquido

Aspecto	Hidrógeno Gaseoso	Hidrógeno Líquido
Presión máxima de operación	350–700 bar (5,000–10,000 psi)	1–10 bar (15–150 psi), típicamente ≈ 5 bar
Temperatura de operación	Ambiente (≈ 20 °C)	Criogénica (≈ –253 °C)
Espesor mínimo permitido	≥ 3.2 mm (1/8") según ASME UG-16 para alta presión	≥ 6 mm (1/4") por aislamiento y resistencia térmica
Materiales más usados (ASTM)	- ASTM A372 (acero aleado) - ASTM A606 (acero estructural) - Compuestos: fibra de carbono + liner de aluminio	- ASTM A240 (acero inoxidable tipo 304/316) - ASTM B209 (aluminio criogénico) - Aislantes multicapa o al vacío
Clasificación ASME Sección II	- Sección II Parte D: UCS para acero al carbono - Sección II Parte D: UNF para materiales no ferrosos	- Sección II Parte D: Austeníticos (304/316) - Sección II Parte D: Aluminio criogénico
Diseño estructural típico	Tipo III o IV (liner metálico + envoltorio compuesto)	Tanques criogénicos con doble pared y aislamiento térmico

Tabla VI aspectos de inspección comparativo gas VS líquido

7.2 Gráfico de barras comparativo

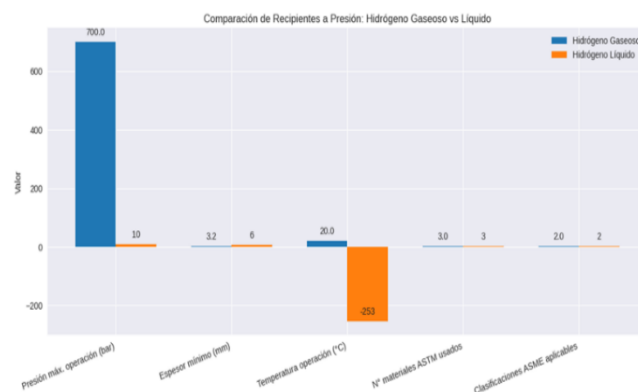


Fig. 7 comparativa inspección líquido VS gas

7.3 Análisis de riesgos operativos

El deterioro de soldaduras, material base y recubrimientos representa un riesgo crítico en ambos tipos de recipientes. En el caso del hidrógeno gaseoso, predominan la fragilización por presión y la fatiga térmica; en el hidrógeno líquido, los riesgos se asocian a contracción criogénica, condensación externa y ruptura frágil.



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



Causa / Riesgo	Hidrógeno Gaseoso (Alta Presión)	Hidrógeno Líquido (Criogénico)
Deterioro de soldaduras	- Fatiga por presión cíclica - Fragilización por hidrógeno (HE) - Microfisuras en zonas HAZ	- Contracción térmica extrema - Criogenic embrittlement - Formación de microgrietas por ciclos térmicos
Deterioro del material base	- Ataque por hidrógeno a alta presión - Desprendimiento de capas internas - Pérdida de ductilidad	- Fragilización a baja temperatura - Condensación de aire líquido externo - Formación de óxidos criogénicos
Deterioro de recubrimientos internos	- Deslaminación por presión - Ataque químico por impurezas - Fallas en adhesión por ciclos térmicos	- Fisuración por contracción - Delaminación por gradientes térmicos - Incompatibilidad con criogenia
Deterioro de recubrimientos externos	- Corrosión atmosférica acelerada - Daños por impacto o abrasión - UV y humedad en exteriores	- Condensación y escarcha externa - Enriquecimiento de oxígeno en aire líquido - Corrosión bajo aislamiento (CUI)
Consecuencias potenciales	- Fugas explosivas - Fallo estructural súbito - Riesgo de ignición por chispas o fricción	- Ruptura frágil - Sobrepresión por evaporación rápida - Formación de mezclas explosivas con aire

Tabla VII Riesgos operativos

7.3.1 Deterioro de soldaduras

•Control de soldadura: procedimientos calificados (WPS/PQR) y ensayos no destructivos periódicos

7.3.2 Deterioro del material base

Recomendaciones de Mitigación

•Materiales resistentes al hidrógeno: como aceros A372, A350-LF2 o inoxidables 316L para criogenia.

7.3.3 Deterioro de recubrimientos.

•Recubrimientos especializados: internos resistentes a permeación de H₂ y externos con protección anticorrosiva o criogénica.

•Monitoreo estructural: sensores de presión, temperatura y ultrasonido para detección temprana de fallas.

•Mantenimiento predictivo: basado en ciclos de carga, historial térmico y condiciones ambientales.

8. Plan de Inspección Basado en Riesgos

Se establece un plan técnico que define métodos, frecuencias y parámetros críticos para cada tipo de inspección. Se incluyen procedimientos con drones, ensayos no destructivos y evaluación de recubrimientos, todo alineado con ASME/API y orientado a la detección temprana de fallas.

8.1 Tipos de inspección y métodos aplicados

Detectar de forma temprana fallas estructurales y funcionales en recipientes a presión para hidrógeno, mediante inspecciones visuales, ultrasónicas y de recubrimientos, alineadas con ASME SEC VIII Div 3, API 510 y normativa específica para hidrógeno.

Aplica a recipientes de hidrógeno gaseoso (alta presión) y líquido (criogénico), en etapas de fabricación, puesta en marcha y servicio continuo

Tipo	Método	Frecuencia Recomendada
Visual interna	Drones con cámara HD	Trimestral (gaseoso) / Semestral (líquido)
Ultrasonido	Drones con sensor UT + mapeo	Trimestral (gaseoso) / Anual (líquido)
Recubrimiento interno	Inspección por cámara + espectroscopía	Semestral (ambos)
Recubrimiento externo	Inspección manual + termografía	Trimestral (gaseoso) / Mensual (líquido)
Soldaduras	Phased Array UT / TOFD / visual	Trimestral (gaseoso) / Semestral (líquido)
Material base	Pruebas de dureza + análisis químico	Anual (ambos)

Tabla VIII tipos de inspección

8.2 Parámetros críticos a evaluar

Los criterios de evaluación incluyen el espesor residual mínimo permitido ≥ 3.2 mm para servicio gaseoso y ≥ 6 mm para líquido—, así como la verificación de la integridad de soldaduras, asegurando ausencia de fisuras, porosidad o falta de fusión. También se evalúa el estado de los recubrimientos interno y externo, considerando adhesión, fisuración, compatibilidad química, corrosión o abrasión, junto con la posible degradación del material base por fragilización asociada al hidrógeno o condiciones criogénicas.

8.3 Procedimiento general

El proceso inicia con la preparación del recipiente mediante aislamiento, despresurización y limpieza interna. La inspección con drones se ejecuta mediante vuelos automatizados con cámara HD y ultrasonido, generando registros georreferenciados. Posteriormente se evalúan los recubrimientos comparándolos con especificaciones técnicas y aplicando pruebas de adherencia. Las soldaduras se inspeccionan con técnicas TOFD o Phased Array en zonas críticas, validando resultados según criterios ASME/API. Finalmente, se elabora un informe técnico con registros



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



Asociación Colombiana
de Ingenieros

fotográficos, mapas de espesor, análisis de riesgo y recomendaciones de reparación o monitoreo.

9. Programa de Inspección Anual

El programa anual organiza las actividades por tipo de recipiente, frecuencia y método, permitiendo una planificación eficiente. Se priorizan inspecciones trimestrales para recipientes de hidrógeno gaseoso y controles mensuales para recubrimientos externos en sistemas criogénicos

9.1 Frecuencias por tipo de recipiente

Actividad	Método	Frecuencia	H ₂ Gaseoso	H ₂ Líquido
Inspección visual interna	Dron con cámara HD	Trimestral	✓	✓
Medición de espesores (UT)	Dron con sensor ultrasónico	Trimestral (gaseoso) Anual (líquido)	✓	✓
Inspección de soldaduras	TOFD / Phased Array UT	Trimestral (gaseoso) Semestral (líquido)	✓	✓
Evaluación de recubrimiento interno	Cámara + espectroscopia	Semestral	✓	✓
Evaluación de recubrimiento externo	Visual + termografía	Trimestral (gaseoso) Mensual (líquido)	✓	✓
Ensayos de dureza / análisis químico	Portátil / laboratorio	Anual	✓	✓
Prueba de hermeticidad (si aplica)	Helio / presión controlada	Anual	✓	✓
Revisión de válvulas y accesorios	Manual / funcional	Trimestral	✓	✓
Informe técnico y actualización de KPIs	Digital	Trimestral	✓	✓

Tabla X frecuencias de inspección por tipo de recipiente

9.2 Actividades técnicas programadas

Con base en la tabla de frecuencias y los ítems definidos, se programan las actividades técnicas de inspección. Tanto en fabricación como en servicio, es necesario realizar un análisis de riesgos que considere las condiciones de seguridad y la disponibilidad del equipo para ser inspeccionado. Estas actividades se coordinan dentro de los programas de construcción o durante las paradas de planta, según corresponda.

10. Matriz de Criticidad Técnica

Se elabora una matriz que clasifica los componentes según su probabilidad de falla e impacto potencial para condiciones de alta y baja presión. Las soldaduras internas y el material base en recipientes de hidrógeno, tanto gaseoso como líquido, presentan la mayor criticidad, lo que fundamenta la necesidad de inspecciones más frecuentes y detalladas.

Componente	Probabilidad de Falla	Impacto Potencial	Criticidad
Soldaduras internas	Alta	Alta	Crítica
Material base	Media	Alta	Crítica
Recubrimiento interno	Media	Media	Moderada
Recubrimiento externo	Alta	Media	Alta
Válvulas y conexiones	Media	Alta	Alta

Componente	Probabilidad de Falla	Impacto Potencial	Criticidad
Soldaduras internas	Media	Alta	Alta
Material base	Alta (fragilización)	Alta	Crítica
Recubrimiento interno	Alta	Media	Alta
Recubrimiento externo	Alta	Alta	Crítica
Válvulas y conexiones	Media	Alta	Alta

Tabla XI probabilidad de falla e impacto potencial en recipientes de alta y baja presión

La probabilidad de falla se determina según las condiciones operativas, ciclos térmicos y presión, mientras que el impacto potencial considera escenarios de fuga, ignición, sobrepresión o falla estructural. La criticidad se clasifica como Alta o Crítica cuando el componente puede comprometer la integridad o la seguridad del sistema.

11. Matriz de Priorización de Inspecciones

Esta matriz cruza la criticidad técnica con la frecuencia recomendada, asignando niveles de prioridad (alta, media, baja) a cada actividad. Permite enfocar recursos en los puntos más vulnerables, optimizando la seguridad y la disponibilidad operativa del sistema.

11.1 Criterios de evaluación

La evaluación de los componentes de interés varía según el tipo de recipiente y de servicio en función de la criticidad definida en el diseño o en la operación del activo

11.2 Asignación de prioridad por componente

Se asignan prioridades de inspección bien sea alta por nivel crítico, media y baja para incluir en inspecciones rutinarias o en paradas de planta.

Componente	Tipo de Hidrógeno	Criticidad Técnica	Frecuencia Recomendada	Prioridad de Inspección
Soldaduras internas	Gaseoso	Crítica	Trimestral	● Alta
Material base	Líquido	Crítica	Anual	● Alta
Recubrimiento interno	Líquido	Alta	Semestral	○ Media
Recubrimiento externo	Líquido	Crítica	Mensual	● Alta
Válvulas y conexiones	Ambos	Alta	Trimestral	● Alta
Medición de espesores	Gaseoso	Crítica	Trimestral	● Alta
Medición de espesores	Líquido	Alta	Anual	○ Media
Inspección visual interna	Ambos	Moderada	Trimestral / Semestral	○ Media
Ensayos de dureza	Ambos	Moderada	Anual	○ Baja



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



Asociación Colombiana
de Ingenieros

- Alta = inspección prioritaria
- Media = inspección programada
- Baja = inspección de seguimiento

Tabla XII criterios de evaluación y prioridades por componente

12. Conclusiones y Recomendaciones

El uso de drones en la inspección de recipientes a presión incrementa la eficiencia, seguridad y trazabilidad, por lo que se recomienda su adopción como práctica estándar junto con planes de inspección basados en riesgo, capacitación especializada y actualización normativa.

12.1 Beneficios operativos del uso de drones

La adopción de drones para la inspección de recipientes a presión se consolida como una solución innovadora que optimiza los procesos tradicionales de mantenimiento, diferenciando beneficios para almacenamiento criogénico y de alta presión. Su aplicación aporta mejoras en seguridad, eficiencia, costos, acceso a zonas críticas y trazabilidad, además de cumplir con requisitos normativos y ser compatible con métodos de inspección visual y por ultrasonido.

Beneficio / Característica	Recipientes de Hidrógeno Gaseoso (Alta Presión)	Recipientes de Hidrógeno Líquido (Criogénico)
Seguridad laboral	Muy alta (elimina trabajos en altura y atmósferas explosivas)	Muy alta (elimina exposición a temperaturas criogénicas)
Eficiencia operativa	Reducción de tiempos de inspección >70%	Reducción de tiempos de inspección >70%
Reducción de costos	Eliminación de andamios, grúas y paradas prolongadas	Eliminación de equipos auxiliares y paradas prolongadas
Acceso a zonas críticas	Inspección de cilindros apilados, válvulas, conexiones	Inspección de aislamiento, cámara de vacío, puntos calientes
Trazabilidad y gestión documental	Integración con CMMS/EAM, reportes automáticos	Integración con CMMS/EAM, mapas térmicos
Compatibilidad con inspección UT	Alta (medición de espesores, corrosión interna)	Moderada (limitada por aislamiento, pero posible con UT avanzado)
Compatibilidad con inspección visual	Muy alta (cámaras 4K, zoom óptico)	Muy alta (cámaras 4K, termografía)
Detección de fugas	Sensores de gas, cámaras térmicas	Termografía, visualización de escarcha
Cumplimiento normativo	API 510, ISO 12619, ASME B31.12, NFPA 55	ISO 13984, ISO 19880-1, NFPA 2, ASME Section VIII
Limitaciones técnicas	Autonomía, acceso a zonas confinadas	Condiciones criogénicas, aislamiento térmico
Evolución tecnológica	Drones UT, IA, autonomía extendida, hidrógeno	Drones de hidrógeno, sensores térmicos avanzados
ROI estimado	Muy alto (reducción de costos y paradas)	Muy alto (reducción de pérdidas y optimización de autonomía)

Tabla XIII Resumen beneficios operativos de la inspección con drones en recipientes de almacenamiento de hidrógeno

12.2 Recomendaciones técnicas y normativas

La implementación de drones en plantas industriales exige seleccionar equipos certificados con sensores avanzados y proveedores con experiencia normativa, junto con protocolos formales que incluyan planificación de vuelos, evaluación de riesgos,

permisos, emergencias y validación de resultados. La certificación de pilotos, analistas y técnicos es esencial para garantizar la correcta ejecución e interpretación de las inspecciones. La integración de datos en sistemas de gestión de activos fortalece la trazabilidad y el mantenimiento predictivo, habilitando aplicaciones de inteligencia artificial. La evaluación del retorno de inversión debe considerar la reducción de tiempos, eliminación de equipos auxiliares, disminución de riesgos y optimización del mantenimiento, apoyándose en casos de éxito para facilitar su adopción.

13. Referencias Técnicas

Se citan las normas ASME y API aplicables, documentación técnica sobre drones industriales, fuentes visuales utilizadas y gráficos generados para este estudio, garantizando la trazabilidad y validez de los resultados presentados.

13.1 Normas ASME y API

Normas relacionadas con ASME Sección VIII División 3 y aquellas derivadas o vinculadas para inspección con drones, incluyendo título, año de emisión y relación normativa.

Norma / Código	Título Oficial	Año de Emisión / Última Edición	Relación con Div. 3 / Inspección con Drones
ASME BPVC Section VIII Division 3	Alternative Rules for Construction of High-Pressure Vessels	2025	Norma base para diseño y fabricación de recipientes de alta presión, incluidos los de hidrógeno.
ASME BPVC Section V	Nondestructive Examination	2025	Regula los métodos END aplicables a Div. 3, incluyendo visual y ultrasonido, base para inspecciones con drones.
ASME BPVC Section II (Parts A-D)	Materials Specification	2025	Define materiales permitidos para recipientes Div. 3; referencia para evaluación de integridad.
ASME BPVC Section IX	Welding, Brazing, and Fusing Qualifications	2025	Requisitos de calificación de soldadores y procedimientos aplicables a recipientes Div. 3.
API 510	Pressure Vessel Inspection Code: In-Service Inspection, Rating, Repair, and Alteration	2022	Norma de inspección en servicio complementaria a Div. 3; aplicable a drones para inspección visual.
API 579-1 / ASME FFS-1	Fitness-For-Service	2021	Evaluación de aptitud para servicio basada en datos obtenidos por drones (visual/UT).
API 572	Inspection Practices for Pressure Vessels	2021	Procedimientos de inspección visual aplicables a drones.
API 571	Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment	2020	Identificación de mecanismos de daño detectables mediante drones (corrosión, fatiga, H ₂ embrittlement).
ASTM E114	Ultrasonic Pulse-Echo Straight-Beam Examination	2023	Base técnica para UT por drones (método pulso-eco).
ASTM E1444/E1444M	Magnetic Particle Testing	2023	Complementaria para END tradicionales; drones aún con limitaciones.
ASTM E1032	Radiographic Examination	2022	END no aplicable a drones, pero referenciada en inspecciones Div. 3.
RAC 100 (Colombia)	Reglamentación Aeronáutica para UAS	2023	Regula operación de drones en inspecciones industriales.
EASA UAS Regulations	European Drone Operations Framework	2021	Categorías abierta, específica y certificada para vuelos de inspección.
FAA Part 107 (EE. UU.)	Small Unmanned Aircraft Systems	2023	Requisitos operativos para drones en inspecciones industriales.

Tabla XIV Normas ASME/ API relacionadas con la inspección con drones en recipientes



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



13.2 Fuentes visuales y gráficas

Flyability – Drone Inspections in Hydrogen Storage Tanks	https://www.flyability.com/industries/oil-gas/hydrogen (flyability.com in Bing)	2023	Imágenes y videos de inspecciones internas en tanques de hidrógeno con drones tipo Elios.
SkySpecs – Industrial Drone Inspections for Energy Infrastructure	https://skyspecs.com/industrial-inspections (skyspecs.com in Bing)	2022	Material visual sobre inspecciones en activos energéticos, incluyendo recipientes presurizados.
DJI Enterprise – Case Studies for Confined Space Inspections	https://enterprise.dji.com/case-studies (enterprise.dji.com in Bing)	2023	Fotografías y videos de drones en espacios confinados aplicables a recipientes de hidrógeno.
Visual Intelligence – UAV-Based Inspection of Pressure Vessels	https://visualintelligence.com/industrial-inspection (visualintelligence.com in Bing)	2021	Gráficos y modelos 3D generados por drones en recipientes industriales.
EnergyWorld – Hydrogen Storage Tank Inspection Using UAVs	https://energyworld.com/hydrogen-uav-inspection (energyworld.com in Bing)	2022	Reportaje visual sobre inspecciones en tanques de hidrógeno líquido.
Aerial Robotics – Ultrasonic Drone Inspection Demonstrations	https://aerialrobotics.com/ut-drone-inspection (aerialrobotics.com in Bing)	2023	Videos y fotografías de drones equipados con sensores UT para medición de espesores.
Hydrogen Europe – Visual Documentation of Hydrogen Infrastructure	https://hydrogeneurope.eu/hydrogen-infrastructure (hydrogeneurope.eu in Bing)	2022	Imágenes de infraestructura de hidrógeno donde se aplican inspecciones remotas.
Elios 3 – Confined Space Inspection Gallery	https://www.flyability.com/gallery	2024	Galería visual de inspecciones internas aplicables a recipientes criogénicos y de alta presión.
NDT.org – UAV NDT Applications	https://www.ndt.org/uav-inspection (ndt.org in Bing)	2021	Fotografías y diagramas de técnicas END aplicadas mediante drones.
Hydrogen Insight – Storage and Safety Visual Reports	https://www.hydrogeninsight.com/storage	2023	Material gráfico sobre tanques de hidrógeno y riesgos asociados.

[13] EASA, "European Union Regulations for Unmanned Aircraft Systems (UAS)", European Union Aviation Safety Agency, Colonia, 2021.

[14] FAA, "Title 14 CFR Part 107: Small Unmanned Aircraft Systems", Federal Aviation Administration, Washington D.C., 2023.

Biografía

Juan Andres Reverend Lizcano

Ingeniero mecánico (Universidad de América,) Master en gestión de calidad (Universidad Camilo Jose Cela y Bureau Veritas), 40 años de experiencia en la supervisión de proyectos de generación eléctrica, petróleo y gas, Drone manager, planes de inspección con tecnología drone en la industria.

Teléfono: +57 3158551308

Dirección: Calle 55ª sur No 64-02 int 61

E mail: jreverend@hotmail.com

Bogotá-Colombia

Tabla XV material audiovisual relacionado con la
inspección de drones en recipientes

13.3 Documentación complementaria

Referencias:

- [1] ASME, "ASME Boiler and Pressure Vessel Code – Section VIII, Division 3: Alternative Rules for Construction of High-Pressure Vessels", ASME International, New York, 2025.
- [2] ASME, "ASME Boiler and Pressure Vessel Code – Section V: Non-destructive Examination", ASME International, New York, 2025.
- [3] ASME, "ASME Boiler and Pressure Vessel Code – Section II (Parts A–D): Materials Specification", ASME International, New York, 2025.
- [4] ASME, "ASME Boiler and Pressure Vessel Code – Section IX: Welding, Brazing, and Fusing Qualifications", ASME International, New York, 2025.
- [5] API, "API 510: Pressure Vessel Inspection Code – In-Service Inspection, Rating, Repair, and Alteration", American Petroleum Institute, Washington D.C., 2022.
- [6] API/ASME, "API 579-1 / ASME FFS-1: Fitness-For-Service", American Petroleum Institute / ASME International, 2021.
- [7] API, "API 572: Inspection Practices for Pressure Vessels", American Petroleum Institute, Washington D.C., 2021.
- [8] API, "API 571: Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment", American Petroleum Institute, Washington D.C., 2020.
- [9] ASTM, "ASTM E114: Ultrasonic Pulse-Echo Straight-Beam Examination", ASTM International, West Conshohocken, 2023.
- [10] ASTM, "ASTM E1444/E1444M: Standard Practice for Magnetic Particle Testing", ASTM International, West Conshohocken, 2023.
- [11] ASTM, "ASTM E1032: Radiographic Examination", ASTM International, West Conshohocken, 2022.
- [12] Aerocivil Colombia, "RAC 100: Reglamentación Aeronáutica para Sistemas de Aeronaves No Tripuladas (UAS)", Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, Bogotá, 2023.