

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

SEDE VIÑA DEL MAR - JOSÉ MIGUEL CARRERA

**ANÁLISIS DE APTITUD PARA EL SERVICIO DE TANQUE
ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE “TK-PAA-002”
EN FAENA MINERA.**

Trabajo de Titulación para optar al Título
de Ingeniero en Mantenimiento Industrial

Alumno:

Maximiliano Antonio de Jesús Perez Bravo

Profesor Guía:

Mg. Ing. Alejandro Badilla Bello



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ "x" Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Análisis de aptitud para el servicio de tanque almacenamiento de combustible "TK-PAA-002" en faena minera.

Nombre del candidato(a): Maximiliano Antonio De Jesús Perez Bravo

Carrera / Grado: Ingeniería en mantenimiento industrial con licenciatura en ingeniería

Campus: Sede Viña del Mar Departamento: Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Alejandro Badilla Bello, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a)

del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

"X" El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (marcar una opción):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 24/06/2026 Firma: _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 24 de jun. de 2026 Firma: _____

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Índice

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
OBJETIVO PRINCIPAL:	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
CAPÍTULO 1: IDENTIFICACION DE NORMAS INTERNACIONALES PARA TANQUE	4
1. ¿Cuál son los objetivos de las normas API?	5
1.1 Norma API 650	5
1.2 Norma API 653	9
1.3 NORMA API 579	11
CAPÍTULO 2: APLICACIÓN DE METODOLOGIA FFS COFORME A LA NORMA API	18
2. Mecanismo de Daño de para evaluación FFS	19
2.1 Procedimiento de evaluación FFS	19
2.2 Parámetros para evaluación FFS	20
2.3 PTR	21
2.4 Implementación de la evaluación FFS al tanque de combustible	21
2.5 Registro y técnica de lectura para la evaluación	23
2.5.1 Paso 1: Calculo del Tmin	24
2.5.2 Paso 2: Parámetros principales de la evaluación	25
2.5.3 Paso 3: Análisis de puntos de lectura PTR	25
2.5.4 Paso 4: Criterio de aceptación	26
2.6 Evaluación nivel 1 y 2	27

2.7 Evaluación de vida remanente	28
2.8 Aptitud para el servicio (FFS)	29
CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE PLAN DE MITIGACION DEL TANQUE	30
3. Propuesta Técnica	31
3.1.1 Inspección visual y END	31
3.2 Propuesta técnica “A”	33
3.3 Propuesta técnica “B”	35
3.4 Comparaciones y Observaciones	38
3.5 Conclusiones	40
REFERENCIAS	41

Índice de imágenes

FIGURA 1. LA UBICACIÓN ACTUAL DEL TANQUE DE COMBUSTIBLE TK-PAA-002.	2
FIGURA 2. PLANO DE LA PARTE SUPERIOR DEL TANQUE TK-PAA-002	13
FIGURA 3. PLANO FRONTAL DEL TANQUE TK-PAA-002	14
FIGURA 4. MAPA DE CALOR DEL ANILLO 1	15
FIGURA 5. MAPA DE CALOR DEL ANILLO 2	15
FIGURA 6. MAPA DE CALOR DEL ANILLO 3	16
FIGURA 7. MAPA DE CALOR DEL ANILLO 4	16
FIGURA 8. MAPA DE CALOR DEL ANILLO 5	17
FIGURA 9. MECANISMOS DE DAÑO	19
FIGURA 10. ETAPAS PARA IMPLEMENTAR LA EVALUACIÓN FFS	20
FIGURA 11. CRITERIO DE ACEPTACIÓN PARA EVALUACIONES NIVEL 1 Y 2	27
FIGURA 12. PLANTILLA DE INFORME DE UT	32

Índice de tabla

TABLA 1. DATOS DEL TANQUE TK-PAA-002	22
TABLA 2. DATOS DE ESFUERZOS ADMISIBLES DEL TANQUE	22
TABLA 3. DATOS DEL FLUIDO	22
TABLA 4. PTR DE ANILLO 4 TK-PAA-002	23
TABLA 5. DE LOS <i>t_{min}</i>	24
TABLA 6. DE LOS TASA DE CORROSIÓN LT Y CR	28
TABLAS 7. COSTOS DE END	31
TABLA 8. DE CÁLCULOS DE LA PROPUESTA A	34
TABLAS 9. COSTOS ASOCIADOS AL CAMBIO DE ANILLO 4	35
TABLA 10. DATOS ASOCIADOS A LA PROPUESTA B	37
TABLA 11. COSTO ASOCIADO A LA PROPUESTA B	37
TABLA 12. CRONOGRAMAS ASOCIADOS A LA PROPUESTA A	39
TABLA 13. CRONOGRAMAS ASOCIADOS A LA PROPUESTA B	40

Siglas y símbolos

Siglas

- FFS = Fitness for service (Aptitud para el servicio)
- API = American Petroleum Institute (Instituto Americano del Petróleo)
- UT = Ultrasonido
- NDE = Non – Destructive Examination (Ensayos no destructivos)
- CML = Corrosion Monitoring Location (Localización de monitoreo de corrosión) es una ubicación específica en el tanque donde se mide el espesor o la corrosión a lo largo del tiempo.
- TML = Thickness Measurement Location (Localización de medición de espesor) Es el complemento de los CML que se usa para designar las posiciones exactas donde se toman las mediciones de espesor.

Símbolos

- H = altura
- D = diámetro
- G= gravedad específica
- E=eficiencia de la junta para el tanque
- mm = milímetros
- m³ = metro cubico
- mpa = megapascals

Resumen

El trabajo de titulación expone un análisis técnico sobre la integridad mecánica y la aptitud para el servicio del tanque de almacenamiento de combustible TK-PAA-002, activo crítico ubicado en una faena minera. El estudio surge ante la detección de un mecanismo de daño por adelgazamiento corrosivo en el Anillo 4 del cuerpo del estanque, lo que representa una amenaza directa a la continuidad operacional del suministro de hidrocarburos para la flota de equipos móviles y vehículos de extracción.

En la primera etapa del proyecto, se establecen los marcos normativos internacionales vigente para la vida del activo, identificando a la norma API 650 como el estándar de diseño y fabricación, mientras que las normas API 653 y API 579 se definen como los pilares para la inspección, reparación y evaluación de aptitud para el servicio (FFS). A través de la aplicación de la metodología FFS, se cuantifica una tasa de corrosión de 0,132 mm/año y se determina que la vida remanente ha sido de 22,7 años y con un límite mínimos de seguridad (T_{min}) aplicando la norma API 653 con 2.54mm; viendo la operatividad del tanque sin una intervención previa.

Para mitigar los riesgos identificados, se desarrollan y evalúan dos propuestas de ingeniería. La Propuesta A contempla el reemplazo integral del anillo afectado, garantizando una restauración total de la integridad mecánica y una vida útil proyectada de 22,7 años. Por su parte, la Propuesta B ofrece una solución de reparación localizada mediante parches traslapados bajo estrictos protocolos de soldadura y control de calidad. El análisis concluye con una justificación económica que evidencia que los costos de mantenimiento son marginales frente al impacto productivo de la faena, la indisponibilidad del combustible afectaría cada hora de detención. De este modo, la investigación proporciona una hoja de ruta técnica y financiera como hipótesis al no contar con toda la información para asegurar la protección del activo, el cumplimiento de las normativas de seguridad y la preservación del medio ambiente en el entorno minero. (Maximiliano Antonio de Jesús, s. f.)

Introducción

En la industria, los sistemas de almacenamiento es un pilar esencial para asegurar la continuidad operacional de cualquier flota de camiones de extracción. Los Tanques bajo ciertas normativas puede realizar una inspección. Por lo cual surge la necesidad de aplicar metodología de Fitness For Service (FFS).

Tras 15 años de servicio continuo, estos tanques han sido un componente esencial para la continuidad operativa, pero asimismo representan un riesgo relevante frente a la degradación por corrosión, asentamientos diferenciales y daños inducidos por las condiciones climáticas de altura (mayores ciclos térmicos, radiación UV y mayor amplitud térmica diaria).

En las faenas mineras, los estanques de almacenamiento de combustible constituyen un componente critico dentro de la infraestructura de soporte operacional, siendo el eje central del abastecimiento energético que permite el funcionamiento continuo de los equipos móviles, plantas de proceso y sistema auxiliares.

Debido a la ubicación remota de la mayoría de las operaciones mineras y a la elevada demanda energética asociada a la extracción, transporte y procesamiento de mineral, la disponibilidad y confiabilidad del sistema de almacenamiento de diésel resulta esencial para garantizar la productividad y la seguridad operacional como muestra la figura 1.



Figura 1. La ubicación actual del tanque de combustible TK-PAA-002.

Fuente: Google Maps

Objetivo Principal:

Evaluar la aptitud para el servicio de un tanque de combustible sometido a condiciones operacionales, utilizando metodología FFS (*API 579-2007 Fitness-For-Service*, s. f.) para determinar su integridad estructural, vida útil remanente y posible acciones de mitigación.

Objetivos Específicos

- Identificar normas aplicables al diseño, inspección y evaluación de tanque de almacenamiento de combustible, haciendo énfasis en los códigos API.
- Aplicar la metodología FFS, conforme a lo establecido en los códigos API, utilizando información operacional e inspecciones para diagnóstico de la condición estructural y los riesgos asociados al estanque.
- Proponer planes de mitigación, reparación o reemplazo basados en los resultados del análisis FFS y en las recomendaciones de norma API, que optimicen la disponibilidad del activo y garanticen el cumplimiento normativo y de seguridad.

CAPÍTULO 1: IDENTIFICACION DE NORMAS INTERNACIONALES PARA TANQUE

1. ¿Cuál son los objetivos de las normas API?

Las normas API establecen los criterios de diseño, fabricación, inspección, operación, mantenimiento y reparación de equipos como tanques de almacenamiento, tuberías, válvulas, bombas, recipientes a presión y otros sistemas industriales. Su aplicación asegura que los activos funcionen bajo condiciones seguras, confiables y sostenibles durante toda su vida útil.

Sus objetivos son:

- Garantizar la seguridad operativa
- Mantener la integridad mecánica de los activos
- Unificar criterios técnicos a nivel internacional
- Promover la calidad y confiabilidad
- Optimizar la operación y mantenimiento
- Proteger el medio ambiente y las personas

1.1 Norma API 650

Su objetivo es garantizar la seguridad, integridad estructural y confiabilidad de los tanques de almacenamiento atmosférico, mediante especificaciones técnicas que aseguren su resistencia mecánica, durabilidad y capacidad de contener líquidos sin fugas ni fallas.

La estructura de los estanques propuestos por el estándar API 650, se divide en 3 partes principales que al unirlos forman el tanque son:

- Fondo
- Manto
- Techo

El fondo puede ser construido de las siguientes maneras sus fundaciones:

- Fundaciones de tierra sin una pared de anillo.
- Fundaciones de tierra con una pared de anillo de roca triturada y grava.
- Fundaciones de tierra con una pared de anillo de concreto.
- Fundaciones de losa.

El manto se refiere al conjunto de planchas que unidas por soldadura a tope con fusión y penetración completa; para ello

el espesor de las planchas del manto debe ser calculado por uno de los siguientes métodos:

- Método de 1 pie, para estanques con menos de 60 m (200pies) de diámetro
- Método del punto de diseño variable, para estanques con más 60 m (200 pies) de diámetro
- Análisis Elástico

El techo es la parte superior del tanque puede ser fijo o flotante. Lo fijo se pueden diseñar de la siguiente manera:

- Techo de cono soportado, Es un techo formado aproximadamente por la superficie de un cono recto que es soportado principalmente ya sea por cabríos en vigas y columnas o por cabríos en cerchas con o sin columnas.
- Techo de cono autoportante, Es un techo formado aproximadamente por la superficie de un cono recto que es soportado sólo en su periferia.
- Techo de cúpula autoportante, Es un techo formado aproximadamente por una superficie esférica que es soportado sólo en su periferia.

- Techo de paraguas autoportante, Es un techo de cúpula modificado formado de manera que cualquier sección horizontal es un polígono regular con tantos lados como planchas del techo hayan, que es soportado sólo en su periferia.

Los tipos de techos flotantes internos:

- Techos flotantes internos metálicos con la parte superior abierta
- Techos flotantes internos metálicos con flotador
- Techos flotantes internos metálicos de plataforma doble
- Techos flotantes internos metálicos sobre flotadores
- Techos flotantes internos metálicos de paneles intercalados
- Techos flotantes internos híbridos

Como Seleccionar los materiales:

- Tipos de acero permitidos:

Acero al carbono laminado en caliente (ASTM A36, A283, A516, etc.). Acero inoxidable en casos especiales (no cubierto directamente por API 650, pero puede aplicarse con criterios adicionales).

- Propiedades requeridas:

Resistencia a la tracción y fluencia. Tenacidad frente a fractura (especialmente en zonas sísmicas o frías). Soldabilidad y conformabilidad.

- Designación de materiales:

Cada componente (fondo, pared, techo, boquillas) debe tener una especificación clara. Se deben considerar factores como corrosión, temperatura de operación y presión interna.

- Corrosión admisible:

Se permite una pérdida de espesor por corrosión según el tipo de líquido y ambiente. Se pueden aplicar recubrimientos internos o ánodos de sacrificio para protección.

- Tolerancias y certificación:

Los materiales deben tener trazabilidad y cumplir con normas ASTM. Se exige certificación del fabricante y pruebas mecánicas.

Principales aspectos para su montaje y preparación del sitio son:

- Nivelación del terreno y construcción de la base (anillo de concreto o cama compactada).
- Verificación de alineación y nivelación antes de colocar el fondo.
- Secuencia de montaje: Instalación del fondo (placas radiales y anulares). Montaje de las virolas (placas verticales del cuerpo). Colocación del techo (puede ser fijo, cónico, flotante o domo).
- Soldadura en campo: Se deben seguir procedimientos calificados (WPS/PQR). Control de distorsión, secuencia de soldadura y limpieza son críticos.
- Control dimensional: Se verifica la verticalidad, redondez y nivel del tanque. Se permiten tolerancias específicas según el diámetro y altura.
- Pruebas preliminares: Inspección visual y ensayos no destructivos (VT, UT, MT, RT). Prueba hidrostática final para verificar estanqueidad.

- Accesorios y acabados: Instalación de escaleras, plataformas, venteos, drenajes y boquillas.
Pintura externa y protección catódica si aplica.

1.2 Norma API 653

La API 653 establece los requisitos mínimos para la inspección, evaluación, reparación y mantenimiento de tanques de almacenamiento [1] ; contruidos conforme a API 650, asegurando que mantengan su integridad estructural y operativa a lo largo de su vida útil.

Aplica para:

- Tanques de acero soldados atmosféricos o de baja presión.
- Tanques usados para almacenamiento de hidrocarburos o combustibles líquidos
- Incluye requisitos para fundaciones, cascos, techos, boquillas, pisos y componentes.

Se realiza la inspección de forma:

- Inspección visual externa: cada 5 años como máximo.
- Inspección interna: cada 10 años o antes si el espesor mínimo proyectado lo requiere.
- Ensayos no destructivos (END): ultrasonido, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, medición de espesores y detección de fugas.
- Registro histórico: toda reparación, inspección y alteración debe documentarse.

Con el resultado de una evaluación de integridad:

- Se evalúa el espesor remanente del fondo, manto y techo comparándolo con el espesor mínimo requerido según API 650. Se consideran mecanismos de deterioro como corrosión, pitting, grietas, deformaciones, asentamientos diferenciales o fatiga de soldadura.

Para una forma de reparación o mitigación pueden ser:

Reparaciones estructurales

- Reemplazo de planchas del fondo o secciones afectadas.
- Por corrosión general o localizada.
- Inserción de planchas de parche.
- Soldadura de refuerzos o placas superpuestas.
- En grietas o zonas debilitadas del manto o techo.
- Reparación o reemplazo de boquillas, manholes y drenes.
- Si presentan fugas o pérdida de espesor.
- Reparación de cordones de soldadura defectuosos.

Acciones de mitigación por adelgazamiento o corrosión

- Revestimiento interno.
- Instalación de sistema de protección catódica.
- Para proteger el fondo del tanque (corriente impresa o ánodos de sacrificio).
- Control de agua libre y drenaje periódico.
- Minimiza la corrosión bajo producto.
- Determina si el tanque puede seguir operando con el espesor actual.
- Ajuste de intervalos de inspección.
- Basado en tasas de corrosión proyectadas.

Acciones de mantenimiento preventivo

- Limpieza interna programada.
- Revisión de sistemas de venteo y rebalse.
- Mantenimiento de pintura exterior.
- Nivelación o reparación de fundaciones (para evitar esfuerzos adicionales).

Alteraciones o reconstrucción

- Se considera alteración cuando se cambia la capacidad, el tipo de servicio o se modifican componentes estructurales relevantes. La reconstrucción aplica cuando el tanque se desarma total o parcialmente y se vuelve a montar. En ambos casos, deben cumplirse los requisitos de diseño y prueba hidráulica de API 650.

1.3 NORMA API 579

La norma tiene como propósito principal evaluar la aptitud para el servicio (Fitness-For-Service, FFS) de equipos que presentan daños, degradación o condiciones fuera de diseño, con el fin de determinar si pueden continuar operando de forma segura y confiable.

Esto aplica para recipientes a presión, tuberías y tanques de almacenamiento. Incluye definiciones relacionadas con tipos de daño, niveles de evaluación y criterios de aceptación.

Existen 3 niveles de evaluación:

- Nivel 1: Evaluación simplificada, conservadora y rápida.
- Nivel 2: Evaluación Intermedia con cálculos más detallados.
- Nivel 3: Evaluación avanzada, incluye análisis numéricos como elementos finitos

Su evaluación depende del tipo de daño que puede ser:

- Daño por corrosión generalizado
- Daño Localizado
- Daño mecánico
- Fisuras

- Daño por hidrogeno
- Daño por Fatiga
- Daño por Fluencia
- Daño por Erosión

Como también se deberían evaluar:

- Evaluación de Soldaduras a través de la verifica la integridad de uniones soldadas frente a defectos o degradación.
- Evaluación de Componentes No Presurizados. Aplica a estructuras auxiliares como soportes o bastidores.
- Evaluación de componentes de tanques de almacenamiento que se consideran fondo, techo y paredes de tanques atmosféricos.
- Evaluación de Daños Combinados con la metodología para analizar múltiples tipos de daño simultáneamente.

Todo esto concluye con la documentación y reporte requiere registrar todos los datos, cálculos, criterios y conclusiones. Fundamental para auditorías, mantenimiento y decisiones operativas.

1.4 Problemática

El problema es que un informe de inspección por ultrasonido (UT) del tanque de almacenamiento Diesel de nombre TK-PAA-002, cuyas lecturas fueron realizadas a lo largo del manto del tanque y fondo, en un periodo de 6 meses. Después de 15 años en operación. Como referencia en las siguientes figuras y planos.

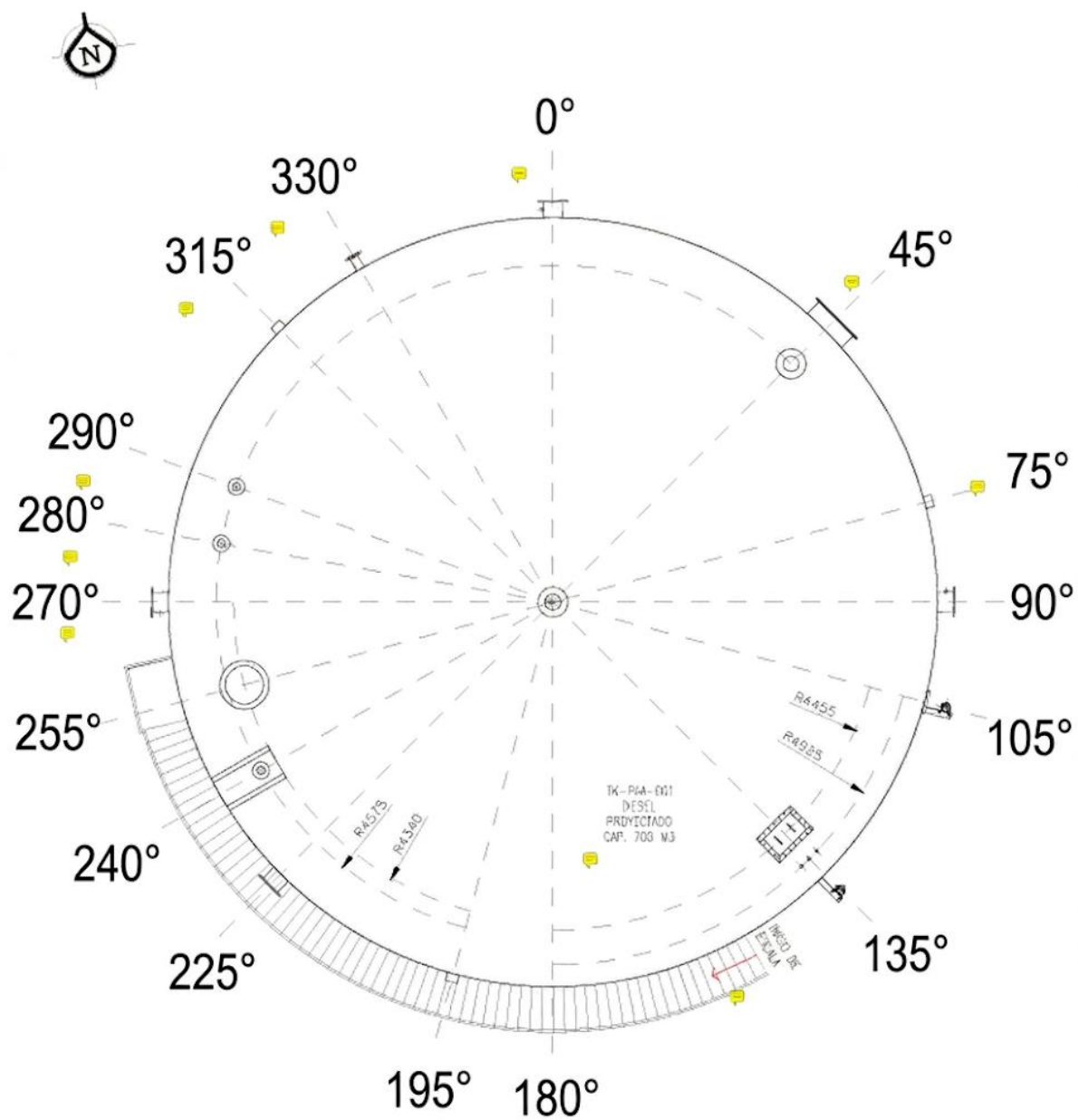


Figura 2. Plano de la parte superior del tanque TK-PAA-002

Fuente: Plano de estanque de combustible CPR

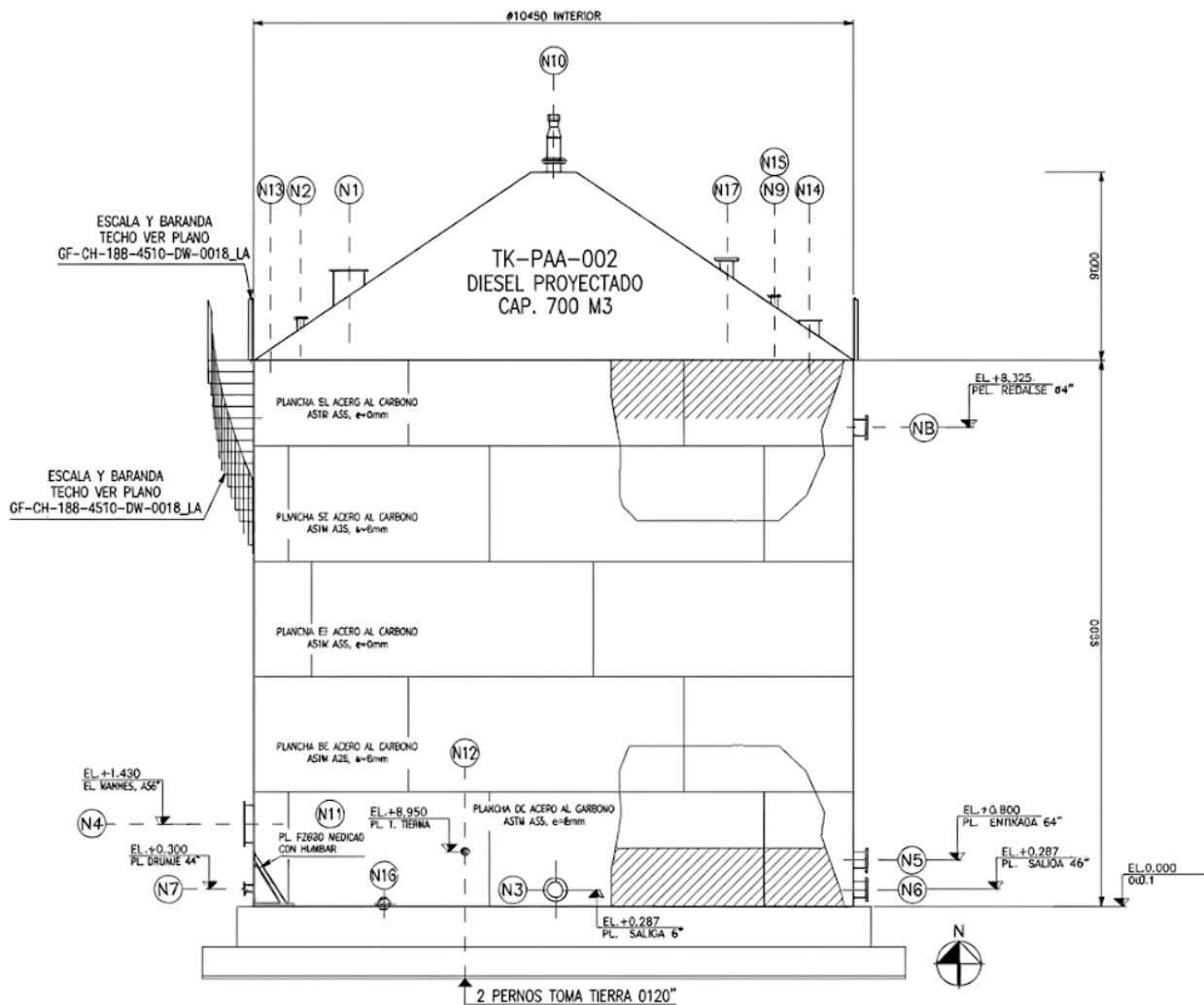


Figura 3. Plano Frontal del tanque TK-PAA-002

Fuente: Plano de estanque de combustible CPR

Al ver el plano los datos que nos dan el UT se buscó una forma sencilla para ver en qué estado esta cada anillo soldado del estanque con la particularidad de que los colores cálidos representen los espesores más pequeños dentro del mapa y los colores fríos representen los espesores máximos con la distinción de ser hechas en los 5 anillos se distribuyen en 10 niveles con una distancia de 200mm por cada anillo y en los grados 0;45;75;90;105;135;180;195;225;240;255;270;290;315;330, se detectó una pérdida de espesor significativa en el anillo 4 en los grados 105°; 135°; 180° en los niveles 4,5,6,7 por ello se debe realizar análisis de aptitud de servicio (FSS) de la zona más crítica.

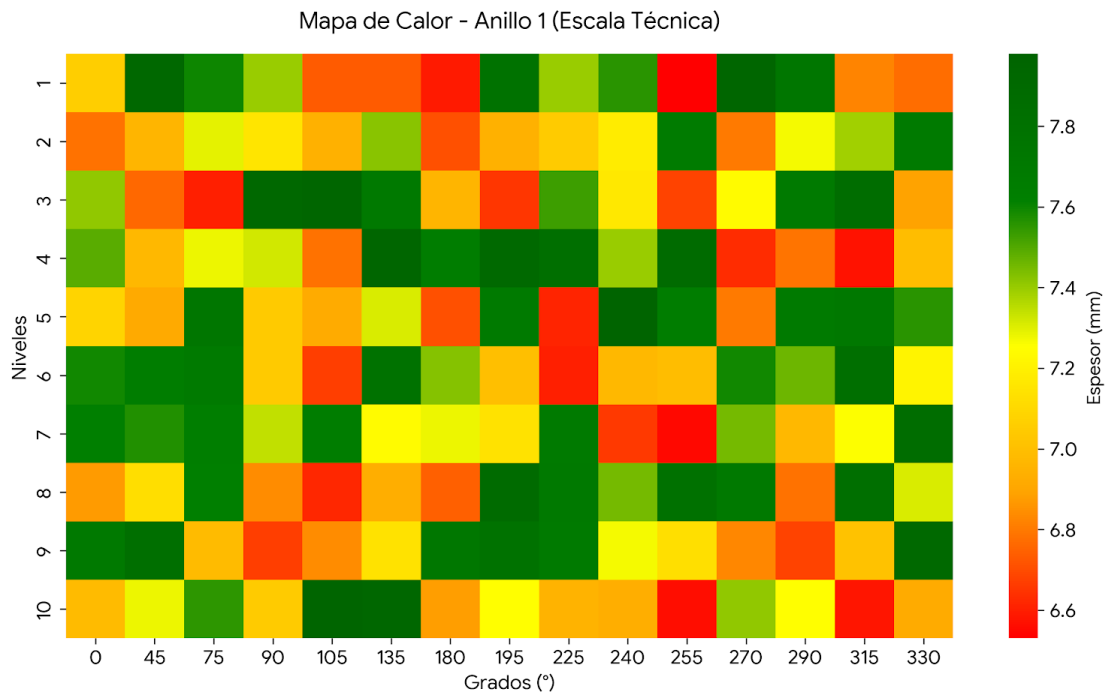


Figura 4. Mapa de calor del anillo 1

Fuente: Elaboración propia

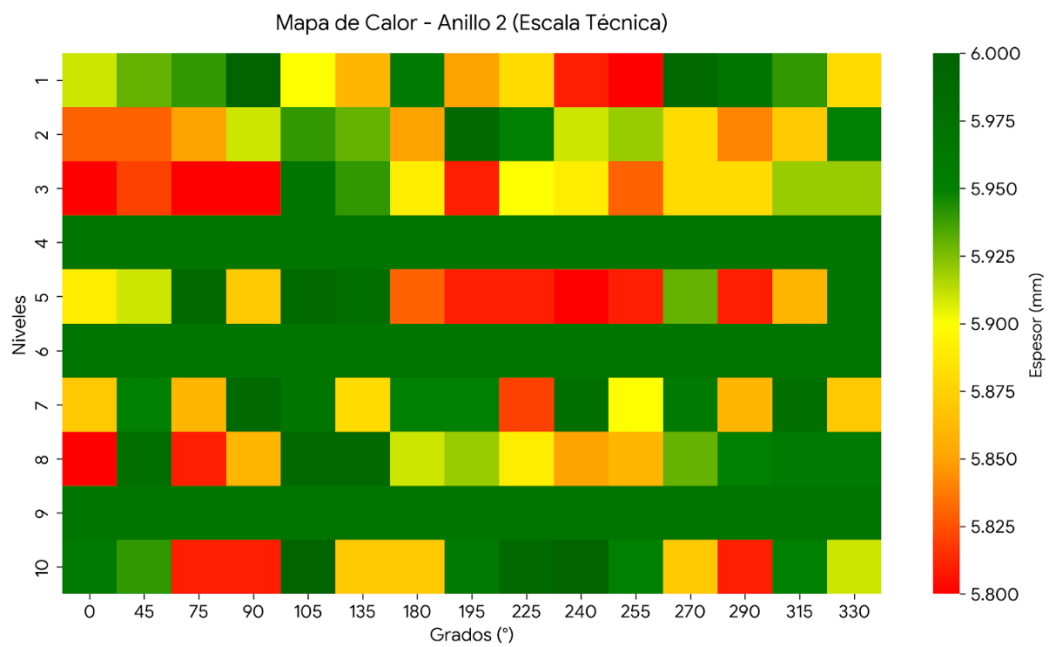


Figura 5. Mapa de calor del anillo 2

Fuente: Elaboración propia

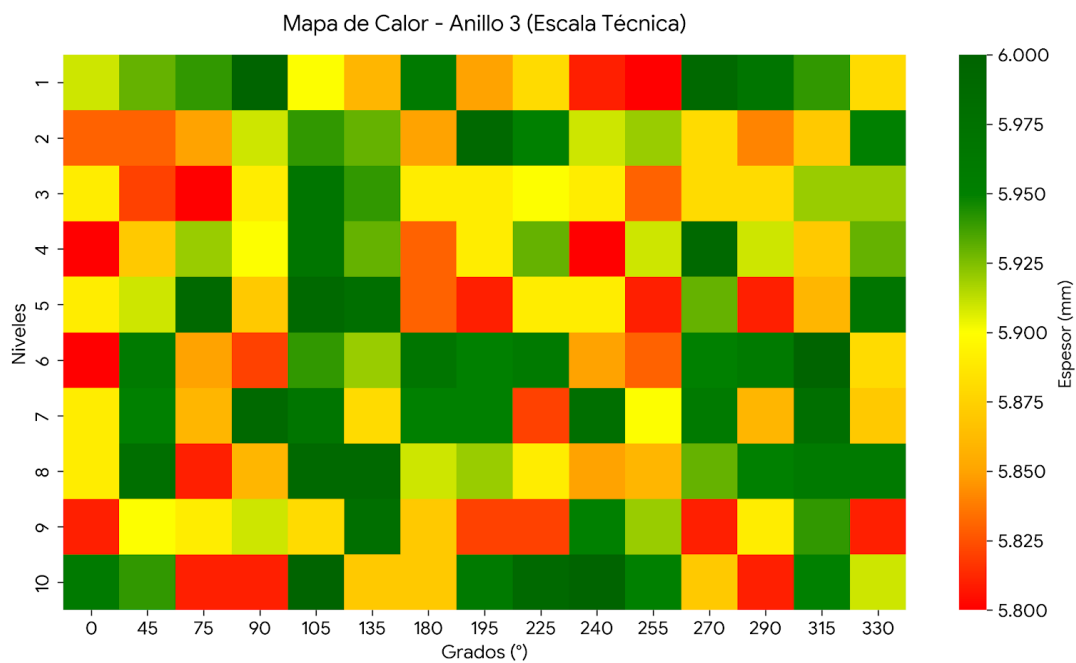


Figura 6. Mapa de calor del anillo 3

Fuente: Elaboración propia

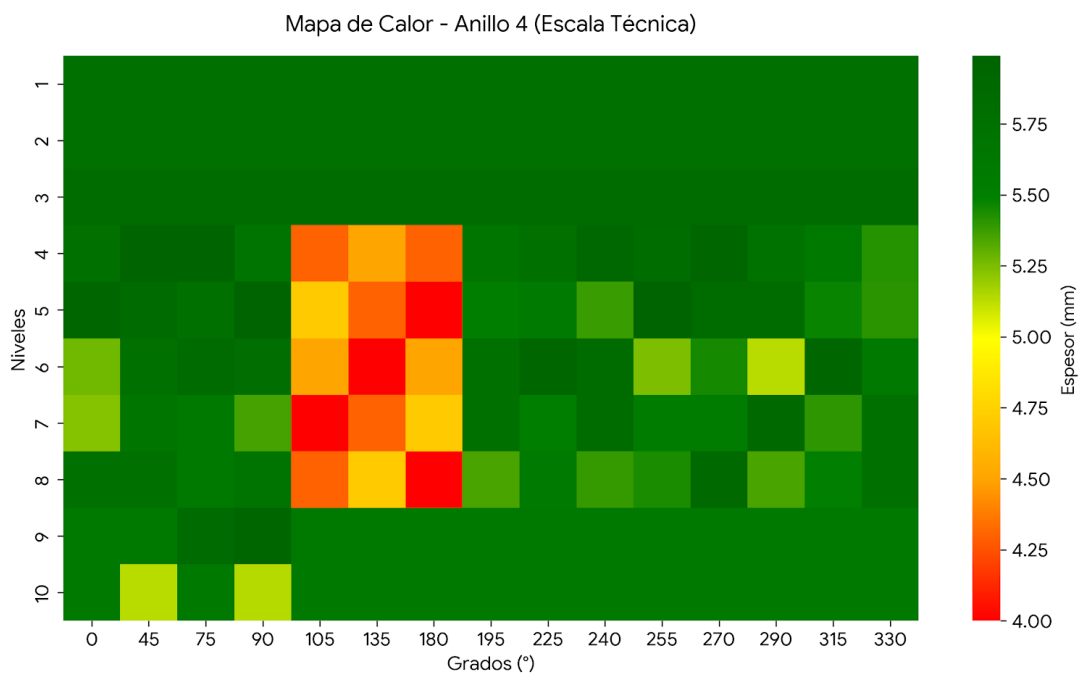


Figura 7. Mapa de calor del anillo 4

Fuente: Elaboración propia

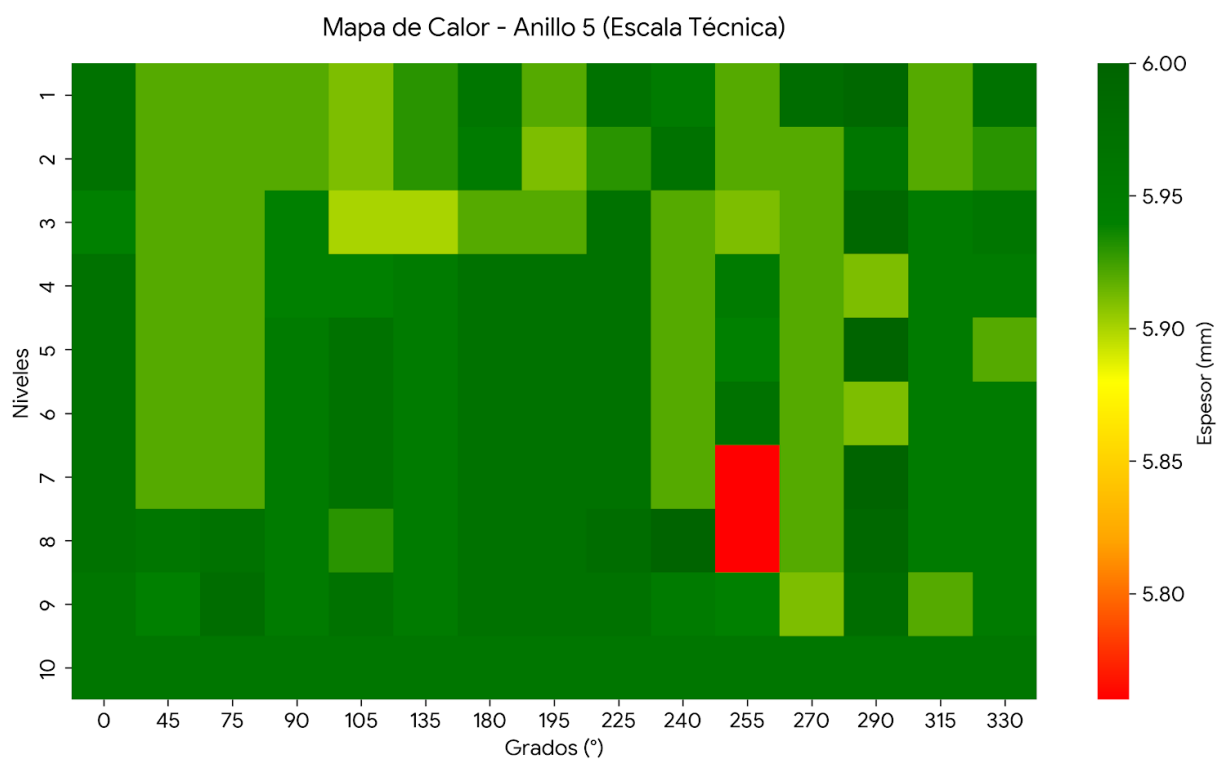


Figura 8. Mapa de calor del anillo 5

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 2: APLICACIÓN DE METODOLOGIA FFS COFORME A LA NORMA API

2. Mecanismo de Daño de para evaluación FFS

Descripción de mecanismo de daño más probable que puedan ocurrir.

Mecanismo de Falla o Daño	Parte	Resumen
Pérdida de Metal General	parte 4	Se proporcionan procedimientos de evaluación para evaluar la corrosión general. Los datos de espesor utilizados para la evaluación pueden ser lecturas puntuales de espesor o perfiles de espesor detallados. Se proporciona una metodología para utilizar los procedimientos de evaluación de la Parte 5 cuando los datos de espesor indican que la pérdida de metal puede considerarse localizada
Pérdida metálica localizado	parte 5	Se proporcionan técnicas de evaluación para analizar áreas locales delgadas individuales y en red, así como defectos con forma de surco en componentes presurizados. Se requieren perfiles detallados de espesor para la evaluación. Los procedimientos de evaluación también se pueden utilizar para evaluar picaduras o ampollas individuales según lo dispuesto en la Parte 6 y la Parte 7, respectivamente.
Corrosión por Picaduras	parte 6	Se proporcionan procedimientos de evaluación para evaluar picaduras ampliamente dispersas, picaduras localizadas, picaduras que ocurren dentro de una región de pérdida local de metal y una región de pérdida localizada de metal ubicada dentro de una región de picaduras ampliamente dispersas. Los procedimientos de evaluación también se pueden utilizar para evaluar una red de ampollas estrechamente espaciadas, según lo previsto en la Parte 7.
Abolladura, Muesca y Combinaciones de Abolladura y Muesca	parte 12	Se proporcionan técnicas de evaluación para evaluar abolladuras, rayones y combinaciones de abolladuras y rayones en componentes.

Figura 9. Mecanismos de daño

Fuente: Norma API 579 [2]

2.1 Procedimiento de evaluación FFS

El procedimiento general de evaluación de Aptitud para el Servicio utilizado en esta Norma para todos los tipos de defectos y mecanismos de daño se proporciona en esta Parte. Se presenta una visión general del procedimiento en los siguientes ocho pasos. Las Partes restantes de esta Norma utilizan esta metodología de evaluación para un tipo específico de defecto o mecanismo de daño y proporcionan detalles específicos que cubren los Pasos 2 a 8 de este procedimiento. [2]

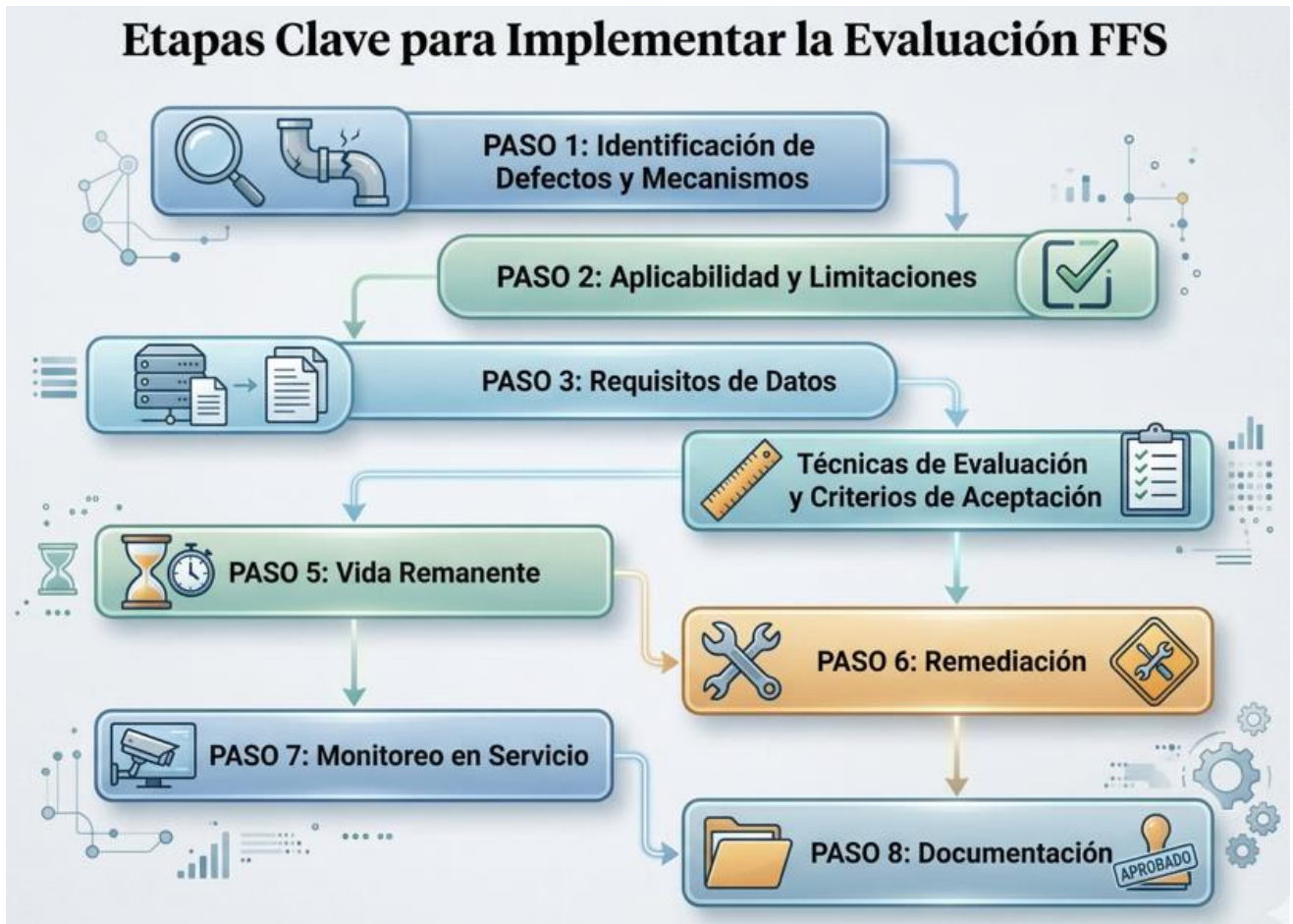


Figura 10. Etapas para implementar la evaluación FFS

Fuente: Elaboración propia

2.2 Parámetros para evaluación FFS

Para la saber que parámetros utilizar primero realizare una descripción de los niveles de evaluación que se realizara de nivel 1 y 2:

Nivel 1: el nivel uno de evaluación FFS es más conservador y menos preciso ya que requiere una mínima cantidad de información en base a las inspecciones.

Nivel 2: el nivel dos de evaluación FFS tiene como objetivo ser más detallado que el nivel 1 pero con mayor necesidad de información para realizar un informe más exhaustivo.

2.3 PTR

Un PTR es el punto de lectura de grosor para determinar el mecanismo de daño por pérdida de metal como también por corrosión dentro de la norma API-579 hace énfasis en la (*API 579-2007 Fitness-For-Service*, s. f.) Puede ser necesaria una inspección adicional, como examen visual, radiografía u otros métodos de END. Se deben utilizar un mínimo de 15 lecturas de espesor, a menos que el nivel de END empleado pueda confirmar que la pérdida de metal es general. En algunos casos, pueden ser necesarias lecturas adicionales según el tamaño del componente, los detalles de construcción utilizados y la naturaleza del ambiente que produce la pérdida de metal.

2.4 Implementación de la evaluación FFS al tanque de combustible

La evaluación de integridad estructural al tanque de combustible se ajusta a las siguientes condiciones en base de la norma API 579:

- Fue construido en norma API 650 y está relacionado con el código de “Welded Steel Tanks for Oil Storage” (Tanques de acero soldado para almacenamiento de petróleo).
- Se tiene información de todas las partes de la estructura desde las base, manto y techo del tanque de almacenamiento como se muestran en las siguientes tablas 1, 2 y 3.

Estanque	“TK-PAA-002”	
Tipo de fundación	Fundaciones de tierra con una pared de anillo de concreto.	
anillos del manto	5 anillos	
tipo de techo	flotante; tipo cono autoportante	
última inspección	2024	año
altura Max llenado	8.16	metros
FCA	1	mm
Diámetro	10	metros
Tnom	6mm anillo 2;3;4;5. 8mm anillo 1	

Tabla 1. Datos del tanque TK-PAA-002

Fuente: Plano de tanque de almacenamiento

ATSM A36		
Esfuerzos admisibles	Valores	Magnitudes
σ_y	250	mpa
σ_r	400	mpa
Sd	160	mpa
St	171	mpa

Tabla 2. Datos de esfuerzos admisibles del tanque

Fuente: Elaboración basada de las tablas de la norma API 650 [3]

Diesel		
Fluido	Valores	Magnitudes
ρ_{fluido}	820	kg/m ³
h_{fluido}	8.16	metros
Gespecifico	0.82	

Tabla 3. Datos del fluido

Fuente: Elaboración propia

2.5 Registro y técnica de lectura para la evaluación

Se comenzará con la técnica de puntos de lectura de espesor (PTR). Ello requiere antes que todo, obtener registro de lectura. Ello permitirá determinar el coeficiente de variabilidad (COV).

		º GRADOS															
		Niveles	0	45	75	90	105	135	180	195	225	240	255	270	290	315	330
Anillo 4	Espesor Nominal de 6mm	1	5.76	5.76	5.76	5.76	5.76	5.76	5.76	5.76	5.76	5.76	5.76	5.76	5.76	5.76	5.76
		2	5.76	5.76	5.76	5.76	5.76	5.76	5.76	5.76	5.76	5.76	5.76	5.76	5.76	5.76	5.76
		3	5.85	5.85	5.85	5.85	5.85	5.85	5.85	5.85	5.85	5.85	5.85	5.85	5.85	5.85	5.85
		4	5.76	5.97	5.99	5.7	4.3	4.5	4.3	5.68	5.76	5.91	5.82	5.95	5.73	5.61	5.42
		5	5.93	5.87	5.76	5.99	4.7	4.3	4	5.52	5.59	5.38	5.97	5.84	5.84	5.47	5.41
		6	5.27	5.76	5.86	5.81	4.5	4	4.5	5.77	5.94	5.85	5.25	5.45	5.13	5.95	5.61
		7	5.23	5.67	5.62	5.36	4	4.3	4.7	5.77	5.52	5.85	5.55	5.56	5.88	5.4	5.76
		8	5.76	5.76	5.62	5.7	4.3	4.7	4	5.35	5.59	5.39	5.44	5.9	5.35	5.51	5.78
		9	5.62	5.62	5.86	5.95	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62
		10	5.62	5.13	5.62	5.14	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62

Tabla 4. PTR de anillo 4 TK-PAA-002

Fuente: Elaboración propia

2.5.1 Paso 1: Calculo del Tmin

Cuando se determina el espesor mínimo aceptable para un anillo completo del cuerpo, t_{min} es calcula de la siguiente manera:

$$t_{min} = \frac{4,9 \times D(H - 3) \times G}{S_d}$$

Es necesario saber la H del cuerpo del tanque que es de 9500 mm; el D del tanque es de 10450mm con una G se calcula de la siguiente forma $\frac{\text{Densidad del liquido}}{\text{Desidad del agua}} = G$ por eso el G específico del combustible es de 0,82 g.

Después de tener todos los valores necesarios se puede sacar el tmin en base de la norma API 650.

Anillos del Estanque	Tmin (mm) norma API 653	Tmin(mm)	Alturas	
Anillo1	2.54	0.45	2	metros
Anillo2	2.54	0.97	4	metros
Anillo3	2.54	1.50	6	metros
Anillo4	2.54	2.02	8	metros
Anillo5	2.54	2.41	9.5	metros

Tabla 5. de los t_{min}

Fuente: Elaboración propia

tmin espesor mínimo aceptable, en in, para cada anillo como es calculado de la fórmula anterior; sin embargo, tmin no deberá ser menor de 0.100 in para ningún anillo del cuerpo.

Tmin del tanque a utilizar en el anillo 4 es de 2.54mm lo cual vamos a priorizar que a través del FFS cual seria los mecanismos de daños que podrían estar involucrados con el tanque de “TK-PAA-02”.

2.5.2 Paso 2: Parámetros principales de la evaluación

Se determina el espesor mínimo medido (t_{min}), el espesor promedio medido (t_{am}) y el factor de desviación de la muestra (S) de las lecturas registradas durante la inspección.

$$1. \quad t_{am} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{rd,i} \quad t_{am} = 5.55 \text{ mm}$$

$$2. \quad S = \sum_{i=1}^N (t_{rd} - t_{am})^2 \quad S = 0,199$$

$$3. \quad COV = \frac{1}{t_{am}} \times \left[\left(\frac{S}{N-1} \right) \right]^{0,5} \quad COV = 0,0029$$

2.5.3 Paso 3: Análisis de puntos de lectura PTR

Despues de realizar los calculos de coeficeinte de variabilidad que presentan zonas de adelgazamiento por corrosion se obtiene un COV por debajo del 10%, como dice la norma “ Si el coeficiente de variación (COV) del PASO 2 es menor o igual al 10%, entonces proceda al PASO 4.” (API 579-2007 *Fitness-For-Service*, s. f.)

$$COV < 0.1 ; \textit{Acceptable}$$

2.5.4 Paso 4: Criterio de aceptación

El COV con un valor de 0,0029 es aceptable para continuar con el método FFS. El criterio de aceptación en paso 4 son de nivel 1 y 2, para tanques atmosféricos indica lo siguiente:

- Para lectura de puntos de espesor (PTR), los niveles 1 y 2 poseen el mismo criterio de aceptación de aceptación en tanques atmosféricos.
- El criterio establece la siguiente relación espesor promedio medido (t_{am}) respecto al espesor mínimo (t_{min}):

$$t_{am} - FCA \geq t_{min}$$

En base lo puntos del UT:

$$5.55 \text{ mm} - 1 \text{ mm} \geq 2.54 \text{ mm} \rightarrow \textit{Acceptable}$$

En base a los puntos críticos del perfil:

$$5.04 \text{ mm} - 1 \text{ mm} \geq 2.54 \text{ mm} \rightarrow \textit{Acceptable}$$

2.6 Evaluación nivel 1 y 2

Criterio de aceptación para tanques atmosféricos

Assessment Parameter	Level 1 Assessment Acceptance Criteria	Level 2 Assessment Acceptance Criteria
Average Measured Thickness from Point Thickness Readings (PTR)	- Cylindrical and Conical Shells, and Elbows $t_{am} - FCA \geq t_{min}$ - Spherical Shells and Formed Heads $t_{am} - FCA \geq t_{min}$ - Atmospheric And Low Pressure Storage Tanks $t_{am} - FCA \geq t_{min}$	- Cylindrical and Conical Shells, and Elbows $t_{am} - FCA \geq RSF_a \cdot t_{min}$ - Spherical Shells and Formed Heads $t_{am} - FCA \geq RSF_a \cdot t_{min}$ - Atmospheric And Low Pressure Storage Tanks $t_{am} - FCA \geq t_{min}$
Average Measured Thickness from Critical Thickness Profiles (CTP)	- Cylindrical and Conical Shells, and Elbows $t_{am}^s - FCA \geq t_{min}^C$ $t_{am}^c - FCA \geq t_{min}^L$ - Spherical Shells and Formed Heads $\min[t_{am}^s, t_{am}^c] - FCA \geq t_{min}$ - Atmospheric And Low Pressure Storage Tanks $t_{am}^s - FCA \geq t_{min}$	- Cylindrical and Conical Shells, and Elbows $t_{am}^s - FCA \geq RSF_a \cdot t_{min}^C$ $t_{am}^c - FCA \geq RSF_a \cdot t_{min}^L$ - Spherical Shells and Formed Heads $\min[t_{am}^s, t_{am}^c] - FCA \geq RSF_a \cdot t_{min}$ - Atmospheric And Low Pressure Storage Tanks $t_{am}^s - FCA \geq t_{min}$
MAWP or MFH from Point Thickness Readings (PTR)	- Cylindrical and Conical Shells, and Elbows Compute the $MAWP_r$ based on the thickness $(t_{am} - FCA)$ Acceptability criteria $MAWP_r \geq MAWP$ - Spherical Shells and Formed Heads Compute the $MAWP_r$ based on the thickness $(t_{am} - FCA)$ Acceptability criteria $MAWP_r \geq MAWP$ - Atmospheric And Low Pressure Storage Tanks Compute MFH_r based on the thickness $(t_{am} - FCA)$ Acceptability criteria $MFH_r \geq MFH$	- Cylindrical and Conical Shells, and Elbows Compute the $MAWP_r^C$ based on the thickness $(t_{am} - FCA)/RSF_a$ Compute the $MAWP_r^L$ based on the thickness $(t_{am} - t_{sl} - FCA)/RSF_a$ Acceptability criteria $\min[MAWP_r^C, MAWP_r^L] \geq MAWP$ - Spherical Shells and Formed Heads Compute the $MAWP_r$ based on the thickness $(t_{am} - FCA)/RSF_a$ Acceptability criteria $MAWP_r \geq MAWP$ - Atmospheric And Low Pressure Storage Tanks Compute the MFH_r based on the thickness $(t_{am} - FCA)$ Acceptability criteria $MFH_r \geq MFH$

Figura 11. criterio de aceptación para evaluaciones nivel 1 y 2

Fuente: Norma FFS de la API 579 [2]

2.7 Evaluación de vida remanente

La vida remanente (RL) corresponde al tiempo restante del tanque para cumplir su objetivo de almacenamiento sin poner en riesgo la seguridad del personal como también medio ambiental esta (RL) será basándose en la tasa de corrosión (CR).

$$\text{Corrosion Rate } ST = \frac{t_{previa} - t_{actual}}{\Delta T}$$

$$\text{Corrosion Rate } LT = \frac{t_{inicial} - t_{actual}}{\Delta T}$$

Donde:

Corrosion Rate = Taza Corrosion

ΔT : Variacion del tiempo

ST : corto plazo

LT : largo plazo

Al tener solo los registros del espesor inicial y el actual la tasa de corrosión largo plazo solamente será la tasa de corrosión para considerar.

Periodo(años)	Registro(mm)	LT (mm/año)	C.Rate (mm/año)
2009	6	0.132872224	0.132872224
2024	4		

Tabla 6. de los Tasa de corrosión LT y CR

Fuente: Elaboración propia

Debido que solo se cuenta de registro de lecturas e inspecciones del año 2024, se precede a la opción de tasa de corrosión a largo plazo (LT). De este modo la tasa de corrosión corresponde al 0.132 (mm/año) considerado la zona más crítica de todo el anillo 4 del manto, la lectura de menor espesor registrado.

$$R_L = \frac{t_{am} - K * t_{min}}{C_{rate}}$$

Donde:

- R_L : Vida remanente
- K : Factor de corrección según nivel de evaluación. Para anillos de tanque atmosféricos, su valor correspondiente a 1 según (API 579)

$$R_L = \frac{5.5mm - 1 * 2.54mm}{0.1328} = 22.7 \text{ Años}$$

2.8 Aptitud para el servicio (FFS)

Es apto para su servicio ya que el criterio de aceptación se ven involucrados las lecturas de espesor puntuales (PTR) como también espesor promedio medido (t_{am}) lo cual se dé, por si menos un factor de corrosión admisible debería ser un valor mayor al espesor mínimo requerido (t_{min}) por ello cumple con lo niveles 2 de aceptación de los dos parámetros de aceptación por “espesor promedio medido a partir de lecturas puntuales”.

$$t_{am} - FCA \geq t_{min}$$

Por como también “espesor medida partir de perfiles de espesor crítico” por lo cual sigue estando en condiciones óptimas ahora su vida útil aproximadamente son 22,7 años entonces se aplicarán los siguientes planes de mitigación.

CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE PLAN DE MITIGACION DEL TANQUE

3. Propuesta Técnica

La operación del activo está lista para su con un periodo de vida remanente de 22.7 años. Por lo cual se debería hacer inspecciones visuales cada 5 años peor para mayor seguridad un END por UT cada 10 años con la finalidad de ver la estabilidad estructural y ver cuáles serían las posibles soluciones de mitigación después de 20 años.

3.1.1 Inspección visual y END

Los ensayos de ultrasonido son cada 5 años que se realizaran 4 veces antes de las implementaciones de las propuestas técnica.

END	Cantidad	Años	Costo Estimado de servicio (USD)
Ultrasonido	4	2030;2035;2040;2045	4950
Empresa subcontratista		números de TML	Costo por cada punto medido (USD)
SGS		750	4.5
Costo total			8325

Tablas 7. costos de END

Fuente: Costos de END a través de una cotización a la empresa subcontratista [4].

 GOLD FIELDS Cliente:		INFORME DE MEDICION DE ESPESORES POR ULTRASONIDO				Anotacion:								
								Planta: Minera Gold Fields						
		Contrato: Presupuesto N°: Procedimiento: Ultra sonido						MEU N°: ITEM: Fecha Medición:						
		Carpeta: Espec.:		Lámina: Corr. Perm.:	Fecha instalación: may-09 Fecha Emisión:									
Puntos son 750 TML distribuidos en 15 TML	DATOS ORIGINALES			MEDICIONES		MES/AÑO		tmin	2.54	mm				
	Ø	Espe	Espe	Espe	Espe	Espe	Fecha	Fecha	Tasa de corrosión (días)					
		Original	Nominal	Retiro	Anterior	Actual	Med. ant.	Med. act.	CR_LT (mm/día)	CR_ST (mm/días)	Vida remanente (días)	frecuencia maxima (años)	frecuencia requerida (años)	Próxima inspección
IN														

Figura 12. Plantilla de Informe de UT

Fuente: Elaboración propia

3.2 Propuesta técnica “A”

La propuesta “A” considera el remplazo de todo el anillo 4 por los cual se deberían realizar los siguientes pasos y cálculos:

(Paso 1) Aislamiento y Preparación:

- Vaciado completo, drenaje, barrido de gases y desgasificación del estanque.
- Aplicación de bloqueo y etiquetado en todas las válvulas y sistemas de bombeo.
- Medición de gases para autorizar el ingreso a los trabajos al interior del estanque.

(Paso 2) Soporte y Apuntalamiento:

- Instalación de andamios perimetrales.
- Instalación de vigas y gatas mecánicas o hidráulicas para sostener el peso del techo y los anillos superiores antes de realizar los cortes en el anillo 4.

(Paso 3) Corte y retiro d material dañado

- Trazado de las líneas de corte horizontales y verticales.
- Corte mediante arco-aire o plasma de la virola completa del anillo 4. Retiro de la chatarra utilizando grúas de pluma.

(Paso 4) Preparación de juntas (Biseles):

- Esmerilado mecánico de los bordes remanentes para generar los biseles y eliminar la Zona Afectada por el calor de los cortes.

(Paso 5) Montaje y Ensamblaje:

- Las grúas plumas ayudaran al levantamiento de las 6 planchas ASTM A36(6mm).
- Posicionamiento y punteado con soldadura. Se deben respetar las separaciones y asegurar que las nuevas juntas verticales estén desfasadas respecto a las soldaduras de los anillos adyacentes.

(Paso6) Soldadura Definitiva:

- Aplicación de soldadura a tope con penetración completa utilizando proceso MIG.
- Secuencia recomendada: soldar primero todas las juntas verticales de las planchas nuevas y posteriormente, las uniones horizontales superior e inferior para minimizar la distorsión por calor.

(Paso 7) Inspección y Pruebas:

- Inspección visual del 100% de los cordones.
- Ensayos volumétricos; Radiografía o ultrasonido en las intersecciones y un porcentaje de las juntas según API650.

Cálculos

$$Perimetro = \pi \times 10,45 \text{ m} = 32,83 \text{ m}$$

$$Area \text{ total del anillo } 4 = 32,83 \text{ m} \times 2 \text{ m} = 65,66 \text{ m}^2$$

Propuesta A: Cambio de anillo total		
H anillo	2	mt
Diámetro	10,45	mt
Perímetro	32,83	mt
Longitud de soldadura	77,66	mt
Planchas	6	planchas
Area reparar	65,66	m2

Tabla 8. de cálculos de la propuesta A

Fuente: Elaboración propia

Con todo esto datos se puede lograr las compras pertinentes para concebir la propuesta A es necesario ver los siguientes costos aproximados.

Propuesta A: Cambio de anillo total		
Materiales	costo aproximado	Cantidad
ASTM A36	4950USD	6 planchas 2*6
ER70S-6	310 USD	35 KG
Mano de obra	costo aproximado	horas hombre
Soldadores (2)	240 USD	22
Ayudante (1)	90 USD	22
Supervisor	140 USD	22
Costo Total	5730 USD	

Tablas 9. costos asociados al cambio de anillo 4

Fuente: Mano de obra en [5];Soldadura [6];Planchas [7]

3.3 Propuesta técnica “B”

La propuesta b mediante parches traslapados que consiste en la reparación técnica mediante la instalación de chapas de refuerzo soldadas por traslape siguiendo los requisitos de la norma API 653 (sección 9.3). Debido a que el área afectada se requiere la colocación de 4 parches para cumplir con las dimensiones máximas permitidas. Los siguientes pasos que con llevan la propuesta “B”.

(Paso 1) Aislamiento y seguridad:

- Vaciado completo, drenaje, barrido de gases y desgasificación del estanque.
- Aplicación de bloqueo y etiquetado en todas las válvulas y sistemas de bombeo.
- Medición de gases para autorizar el ingreso a los trabajos al interior del estanque.

(Paso 2) Preparación de superficie y validación:

- Realización de ultrasonido (UT) en todo el perímetro externo donde se depositará la soldadura para garantizar que el espesor base remanente es capaz de soportar el arco eléctrico sin perforarse.
- Limpieza del metal a trabajar de los anillos 4 al 7.

(Paso 3) Habilitación de los parches:

- Corte de los 4 parches de acero ATSM A36 de 6mm.
- Paso critico: Esmerilado de todas las esquinas de los parches para otorgarles un radio de curvatura mínimo de 50mm.

(Paso 4) Presentación y Ajuste:

- Colocación de los parches cubre la zona dañada asegurando un contacto de metal a metal.
- Verificación de que el parche cubre la zona adelgazada con un traslape mínimo de 25mm hacia el metal de mejor condición en todas las direcciones.

(Paso 5) Soldadura final

- Ejecución de un cordón de soldadura de filete completo y continuo en el 100% del perímetro de cada parche.

(Paso 6) Inspección y Pruebas

- Inspección mediante líquidos penetrantes o partículas magnéticas en los cordones.
- Prueba de hermeticidad mediante caja de vacío para asegurar que no existen poros pasantes en las soldaduras que provoquen filtraciones futuras

Propuesta B: Parche en la zona Afectada		
H parche	1,8	mt
Ancho Parche	0,9	mt
Planchas	2	planchas
Longitud de soldadura	21,6	mt
Ancho zona dañada	6,84	mt
H zona dañada	0,8	mt

Tabla 10. datos asociados a la propuesta B

Fuente: Elaboración propia

Propuesta B: Parche en la zona Afectada		
Materiales	costo aproximado	Cantidad
ASTM A36	1650 USD	2 planchas 2*6
ER70S-6	40 USD	4,5 kg
Mano de obra	costo aproximado	horas hombre
soldadores (2)	1800 USD	17 hr
Ayudante (1)	850 USD	25 hr
Supervisor	1000 USD	7 hr
Costo Total	5340 USD	

Tabla 11. Costo asociado a la propuesta B

Fuente: Mano de obra en [5];Soldadura [6];Planchas [7]

3.4 Comparaciones y Observaciones

Las comparaciones de tiempo son evidentes ya que en 18 días se demora la propuesta A; en cambio la propuesta B se demora en 7 días para cumplir con el objetivo de asegurar la seguridad estructural del estanque.

Propuesta A			
Fase	Actividad	Duración (Días)	Predecesora
1. Planificación	Aprobación de presupuesto y gestión de permisos	1	inicio
1.1 Planificación	Adquisición de 6 planchas ASTM A36 y consumibles ER70S-6	5	1
1.2 Planificación	Contratación de personal calificado (Soldadores 6G) y END	2	1
1.3 Planificación	Elaboración de Matrices de Riesgo (IPER) y Permisos SHA	1	1
2.1 Preparación	Bloqueo LOTO y Drenaje total del estanque	1	1.1;1.2;1.3
2.2 Preparación	Desgasificación, ventilación y medición de atmósferas	1	2.4
2.3 Preparación	Limpieza Industrial (retiro de lodos y sedimentos)	2	2.4
2.4 Preparación	Montaje de andamiaje perimetral (Interior/Exterior)	2	2.1
3. Ejecución (Ruta Crítica)	Instalación de soporte estructural y apuntalamiento	3	2.2;2.3
3.1 Ejecución (Ruta Crítica)	Corte y retiro de virolas dañadas del Anillo 4	3	3
3.2 Ejecución (Ruta Crítica)	Preparación de juntas (Biselado mecánico de anillos 3 y 5)	2	3.1
3.3 Ejecución (Ruta Crítica)	Montaje, presentación y punteado de planchas nuevas	1	3.2
3.4 Ejecución (Ruta Crítica)	Soldadura de unión a tope (Proceso MIG/SMAW)	2	3.3

4. Cierre	y	Inspección Visual y Ensayos No Destructivos (UT/RT)	1	4.1
4.1 Cierre	y	Prueba de hermeticidad mediante Caja de Vacío	1	4.2
4.2 Cierre	y	Aplicación de revestimiento protector en juntas	2	3.4
4.3 Cierre	y	Desmontaje de andamios y entrega de activo (Puesta en marcha)	1	4

Tabla 12. Cronogramas asociados a la propuesta A

Fuente: Elaboración Propia

Propuesta B			
Fase	Actividad	Duración (Días)	Predecesora
1.1 Planificación	Permisos de Trabajo y Análisis de Riesgo (SHA)	0.5	inicio
1.2 Planificación	Adquisición de Materiales (2 Planchas 6mm + Hilo)	1	1.1
2. Preparación	Bloqueo LOTO y Drenaje de Estanque	0.5	1.2
2.1 Preparación	Desgasificación y Ventilación Forzada	0.5	2
2.2 Preparación	Limpieza Mecánica (SSPC-SP 10) en áreas de soldadura	0.5	2.1
2.3 Preparación	Validación de espesores por UT en perímetro de parches	0.5	2.2
3. Ejecución	Corte y Habilitado de Parches (Radio 50mm)	0.5	2.3
3.1 Ejecución	Montaje y Punteado (Fit-up)	0.5	3
3.2 Ejecución	Soldadura de Filete Completo (MIG/GMAW)	1	3.1
4. Control y Cierre	Ensayos No Destructivos (Caja de Vacío/Tintas)	0.5	3.2
4.1 Control y Cierre	Revestimiento Protector y Puesta en Servicio	0.5	4

Fuente: Elaboración propia

3.5 Conclusiones

El desarrollo de FFS logra su saber que si es apto para su función que es almacenar 700 m³. A través de cada capítulo precede que el tanque de combustible TK-PAA-002 presentaba una condición de vulnerabilidad crítica debido a un mecanismo de daño por adelgazamiento por corrosión en el Anillo 4, con un espesor más delgado de 4 mm fue identificado con lo que conlleva a la posibilidad de aplicación de la normativa internacional, estableciendo a la norma API 650 como el estándar de diseño original que sugiere como espesor mínimo de seguridad 2.54 mm como también las normas API 653 y API 579 como las herramientas para la inspección y la evaluación de aptitud para el servicio (FFS). La integración de estas normas permitió transformar una inspección en un diagnóstico cuantitativo que determina la vida remanente de 22 años para tanque que se encontraba en límites de seguridad operativa.

En respuesta a dicho diagnóstico, la ingeniería propuesta no se limitó únicamente a la detección del problema, sino que proyectó soluciones concretas bajo dos escenarios diferenciados. Por un lado, la Propuesta A, consistente en el cambio integral de anillo, que se posiciona como la estrategia de mayor confiabilidad al garantizar una vida útil remanente mediante el cambio de las condiciones de diseño originales. Por otro lado, la Propuesta B ofrece una alternativa de mitigación rápida y económica para situaciones de emergencia a través de parches soldados. La viabilidad de estas intervenciones queda plenamente justificada al contrastar los costos de reparación frente a los riesgos económicos y ambientales del entorno minero. Se determinó que el costo de la reparación mayor representa apenas una fracción marginal frente al impacto de una detención no programada de la flota de vehículos, donde solo una hora de inactividad de los equipos móviles generaría pérdidas en la logística del mineral.

Se establece que la implementación de estos planes de mitigación solo protege el aspecto económico de la organización al evitar multas ambientales y paradas de producción. Al aplicar los procedimientos de soldadura y control de calidad bajo estándares API, se asegura que el tanque TK-PAA-002 opere bajo una condición de riesgo controlado. Por tanto, este análisis cierra el ciclo de gestión de activos, demostrando que la inversión para la integridad mecánica es la decisión

estratégica más rentable para asegurar el suministro interrumpido de combustible, motor fundamental de la operación minera.

Referencias

- [1] API, API-653-Español, 2020.
- [2] API, API 579 Fitness-For-Service, 2007.
- [3] API, API-650-ESPAÑOL, 2021.
- [4] SGS, «SGS,» [En línea]. Available: <https://www.sgs.com/es-cl.>
- [5] Computrabajo, «Computrabajo,» [En línea]. Available: <https://cl.computrabajo.com>.
- [6] Indura, «Indura,» [En línea]. Available: <https://www.airproducts.cl>.
- [7] AZA, «AZA,» [En línea]. Available: <https://www.aza.cl>.