

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

SEDE SAN JOAQUÍN- SANTIAGO DE CHILE

**EVALUACION DE INTEGRIDAD MECÁNICA ASME FFS-1/API 579 A TANQUE DE
ALMACENAMIENTO DE EMPRESA FORESTAL**

Trabajo de Titulación para optar al Título
Profesional de Ingeniería en Mantenimiento
Industrial, Licenciatura.

Alumno:

Álvaro Esteban Villalobos Silva

Profesor Guía:

Mg. Ing. Alejandro Elías Badilla Bello

2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: EVALUACION DE INTEGRIDAD MECÁNICA ASME FFS-1/API 579 A TANQUE DE
ALMACENAMIENTO DE EMPRESA FORESTAL

Nombre del candidato(a): Álvaro Esteban Villalobos Silva

Carrera / Grado: Ingeniería en Mantenimiento Industrial, Licenciatura.

Campus: San Joaquín

Departamento: Departamento de Ingeniería Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Alejandro Elías 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)

☒ 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

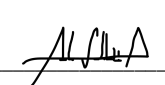
Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

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

Fecha: 05/12/2025 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 05/12/2025 Firma: 

RESUMEN

Keywords: FFS; integridad mecánica; API 579; API 650; teoría de falla; aptitud; mecanismo de deterioro; corrosión; confiabilidad; CR; esfuerzo; espesor; vida remanente.

A lo largo de este documento, se implementó la normativa *ASME FFS-1/API 579, Evaluación Parte 4*, aplicada a un estanque clarificador API 650 del sector forestal (producción de celulosa) y se desarrolló una propuesta técnica, basada en los resultados de la normativa mencionada.

La problemática inicial que abordó este trabajo se basó en un informe de inspección realizado al tanque clarificador de licor verde N°2, perteneciente la planta celulosa de una empresa del sector forestal ubicada en la región del Biobío. El equipo mencionado presentó una pérdida de espesor considerable en su anillo N°4, y mostró espesores menores a 6[mm] en algunas áreas. La norma API-650 especifica que el espesor mínimo admisible para un estanque de almacenamiento a presión atmosférica de diámetro entre 15 [m] y 36 [m] debe ser sobre 6 [mm]. El cliente (empresa) solicitó ante ello, efectuar un estudio que permitiese conocer la integridad estructural y vida remanente de equipo.

La función del tanque calificador ha sido de gran importancia en el ciclo de caustificación dentro de la planta celulosa, ya que permite almacenar de licor verde crudo. Este licor verde es una solución química llamado smelt, con el que más adelante será mezclado con cal, para la obtención de licor blanco (caustificación), cerrando con ello el ciclo de auto sustentabilidad energética en la fabricación de celulosa y la continuidad productiva de la misma.

El marco de trabajo utilizado en la implementación de la normativa correspondió a la *Evaluación Parte 4* (Pérdida general de metal) de la norma *ASME FFS-1/API 579*. Pudiéndose así determinar una vida remanente (RL) de 2 años para el equipo, con una tasa de corrosión (CR) de 0.282 [mm/año]. Esto se consideró un intervalo acotado pero razonable de tiempo para desarrollar e implementar medidas de mitigación.

Una vez consolidados los resultados obtenidos a través de la evaluación de integridad mecánica API 579/FFS-1, se propusieron 2 medidas: intervención correctiva y mantenimiento preventiva. Para ambas se estimaron los costos de producción e impacto económico junto con las consecuencias de no intervenir. En esta etapa del trabajo de título, se pudo establecer que los riesgos de no ejecutar acciones mitigatorias o preventivas bordearían los USD \$ 9.300.000.

Determinar la aptitud de la integridad mecánica de este equipo fue fundamental para asegurar su retorno al servicio con directrices claras de intervención sobre el activo, acorde a los estándares de seguridad vigentes, y en pro de asegurar la función operativa del equipo evaluado.

ÍNDICE

RESUMEN

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE GRÁFICOS

ÍNDICE DE TABLAS

ACRÓNIMOS Y SIMBOLOGÍA

INTRODUCCIÓN

OBJETIVO GENERAL

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DEL CONTEXTO OPERACIONAL Y METODOLOGÍA

1. CONTEXTO OPERACIONAL Y METODOLOGÍA

1.1. DESCRIPCIÓN DE EMPRESA Y PLANTA

1.1.1. Línea de fabricación de Celulosa

1.1.2. Línea de recuperación y energía

1.1.3. Caustificación y tratamiento del smelt

1.1.4. Productos principales y sub productos

1.2. PROBLEMÁTICA Y ANTECEDENTES DEL EQUIPO

1.2.1. Observaciones sobre hallazgos en el equipo

1.3. IDENTIFICACIÓN DE EQUIPO EN PLANTA

1.3.1. Funciones

1.3.2. Contexto Operacional

1.3.3. Aspectos específicos

1.4. TANQUE ATMOSFÉRICO

1.4.1. Aspectos Teóricos Principales

1.4.2. Parámetros de Diseño

1.4.3. Diseño, Inspección y Gestión del Mantenimiento

1.5. OBSERVACIONES Y METODOLOGÍA

CAPÍTULO 2: APLICACIÓN DE NORMATIVA ASME FFS – 1 / API 579 Y PROPUESTA TÉCNICA

2. APLICACIÓN DE NORMATIVA ASME FFS – 1 / API 579 AL EQUIPO

2.1. ASME FFS-1 / API 579 FITNESS FOR SERVICE

2.3.1. Evaluaciones FFS y mecanismos de daño

2.3.2. Mecanismos de daño y flaws

2.3.3. Procedimiento general para evaluaciones

2.3.4. Criterios (Niveles) de evaluación

2.2. PARÁMETROS DE EVALUACION Y LECTURAS DE ESPESOR

2.3.1. Puntos de lectura de espesor (PTR)

2.3.2. Perfil de espesor (CTP)

2.3.3. LOSS

2.3.4. FCA

- 2.3.5. Altura máxima de llenado (MFH)
- 2.3. IMPLEMENTACIÓN DE EVALUACIÓN FFS AL ESTANQUE CLARIFICADOR
- 2.3.1. Registro y técnica de lectura para la evaluación
- 2.3.2. Evaluación: Nivel 1 y 2
- 2.3.2.1. Paso 1: Determinar espesor mínimo
- 2.3.2.2. Paso 2: Parámetros principales de la evaluación
- 2.3.2.3. Paso 3: Análisis de puntos de lectura PTR
- 2.3.2.4. Paso 4: Criterio de aceptación
- 2.3.3. Vida útil remanente (RL)
- 2.3.4. Observaciones Finales y escenarios de intervención

CAPÍTULO 3: DESARROLLO DE PROPUESTA TÉCNICA Y APROXIMACIÓN DE COSTOS

3. PROPUESTA TÉCNICA Y APROXIMACIÓN DE COSTOS

- 3.1. PROPUESTA TÉCNICA
- 3.2. COSTOS
- 3.2.1. Propuesta 1: Instalación de parche en la región afectada
- 3.2.1.1. Costos de materiales y consumibles
- 3.2.1.2. Mano de obra
- 3.2.1.3. Inspección y NDT
- 3.2.1.4. Costos por producción
- 3.2.2. Propuesta 2: Reemplazo del anillo completo
- 3.2.2.1. Costo materiales y consumibles
- 3.2.2.2. Mano de obra (HH)
- 3.2.2.3. Costos de inspección y ensayos
- 3.2.2.4. Costo de producción
- 3.3. IMPACTO EN LA PRODUCCIÓN
- 3.4. RESUMEN, COMPARATIVA Y OBSERVACIONES
- 3.4.1. Comparativa de propuestas
- 3.4.2. Recomendaciones y observaciones finales

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

- ANEXO 1: MECANISMOS DE DAÑO Y DEFECTOS (FLAWS)
- ANEXO 2: DESGLOSE COSTOS SOLDADURA (PROPUESTA 1)
- ANEXO 3: DESGLOSE COSTOS SOLDADURA (PROPUESTA 2)
- ANEXO 4: PROYECCIÓN ETAPA DE DESGASTE Y CONFIABILIDAD

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Método de pulpeo kraft o al sulfato..... 6

figura 2. Zona de corrosión adyacente al parche de refuerzo..... 8

figura 3. Vista de eje 180° del tanque clarificador nº2..... 8

figura 4. Lecturas anillo 4. 9

figura 5. Condición aceptable de espesor nominal.....11

figura 6. Estructura taxonómica.....12

figura 7. Diagrama del ciclo de producción y equipo.....13

figura 8. Diagrama de disposición del sistema 15

figura 9. Clasificación tanques atmosféricos 16

figura 10. Aspectos principales de la teoría de falla. 17

figura 11. Defecto (flaw) similar a agrietamiento. 23

figura 12. Principales puntos de referencia en la evaluación ffs.....26

figura 13. Orientación de unión o costura del tanque al medir. 26

figura 14. Defectos localizados en superficie. Fuente: API 579.....27

figura 15. Red de defectos por corrosión. 28

figura 16. Procedimiento general de evaluación para cada sección o parte 30

figura 17. Esquema de anillos de tanque clarificador nº2. 32

figura 18. Procedimientos y escenarios de intervención 43

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfica 1. Condiciones de operatividad. 41

Gráfica 2. Vida remanente (RL) modelada. 41

Gráfica 3. Escenario de desgaste de estanque nº2 55

Gráfica 4. Confiabilidad estimada anillo nº4 56

Gráfica 5. Costos de c/propuesta a lo largo de vida útil. 56

Gráfica 6. Impacto en producción 57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Mapa de calor anillo 4. Fuente: autor, basado en informe.....	10
Tabla 2. Normativa y criterios	19
Tabla 3. Evaluaciones del estándar FFS	22
Tabla 4. Pasos para una evaluación de integridad mecánica	24
Tabla 5. Datos estanque clarificador nº2	31
Tabla 6. Información sobre fluido contenido y esfuerzos.	31
Tabla 7. Esfuerzos admisibles según materiales listados	32
Tabla 8. Esfuerzos admisibles en el equipo según norma	33
Tabla 9. Formato de llenado para PTR	33
Tabla 10. PTR (puntos de lectura de espesor) del anillo nº4.	35
Tabla 11. PTR agrupadas en 5 ejes meridionales.	36
Tabla 12. Criterio de aceptación para niveles 1 y 2 (evaluación parte 4).....	37
Tabla 13. Criterio de aceptación para niveles 1 y 2 (parte 2).....	38
Tabla 14. Datos y criterio de aceptabilidad.....	38
Tabla 15. Obtención de cr para el estanque	39
Tabla 16. Datos agrupados de vida remanente (RL).	40
Tabla 17. Dimensiones para el 18% crítico.....	47
Tabla 18. Resumen costos de materiales (propuesta 1)	47
Tabla 19. Tiempo total en completar obra.....	48
Tabla 20. Costos de hh (propuesta 1)	48
Tabla 21. Costos inspección y ndt (propuesta 1).....	48
Tabla 22. Costos producción (propuesta 1)	49
Tabla 23. Dimensiones para cálculo de propuesta 2	49
Tabla 24. Resumen costos de materiales (propuesta 2)	50
Tabla 25. Tiempo total en completar obra.....	50
Tabla 26. Costos de hh (propuesta 2)	51
Tabla 27. Costos inspección y ndt (propuesta 2).....	51
Tabla 28. Costos producción (propuesta 2)	52
Tabla 29. Datos recopilados de producción licor verde.....	53
Tabla 30. Producción estimada de tanques clarificadores 1 y 2.	53
Tabla 31. Costos ineficiencia (impacto) estanque clarificador nº2.	53
Tabla 32. Riesgos sha asociados.....	54
Tabla 33. Costo total (riesgo) acumulado.....	54
Tabla 34. Indicadores y desglose de propuestas	58
Tabla 35. Desglose de material depositado y costos de soldadura	67
Tabla 36. Desglose de material depositado y costos de soldadura	69
Tabla 37. Parámetros Weibull.....	70
Tabla 38. Documentación de cálculos para la gráfica de desgaste	71

ACRÓNIMOS Y SIMBOLOGÍA

AMEF	:	Análisis de modos y efectos de falla
ASME	:	American Society of Mechanical Engineers
AWS	:	American Welding Society. Norma para la soldadura estructural de acero
CCS	:	Cámara de Comercio Santiago (Chile)
COV	:	Coeficient of variability.
CTP	:	Puntos de espesor críticos, por sus siglas en inglés, critical thikness point.
CMPC	:	Compañía Manufacturera de Papeles y Cartones
CUI	:	Corrosion Under Insulation. Por sus siglas en inglés, corrosión bajo aislamiento
Ha	:	Hectáreas.
HIC	:	Hydrogen Inducted Cracking.
RUL	:	Remaining Useful Life.
FFS	:	Fitness for Service.
Gr.	:	Grade.
Un.	:	Unidades.
h	:	Hora(s).
MJ	:	Mega Joules.
MO	:	Mano de Obra.
PTR	:	Puntos de lectura de espesor, por sus siglas en inglés, point thikness readings.
SHA	:	Seguridad, higiene, ambiente. Asociado al impacto económico de estos 3 conceptos.
USD	:	USA dólares, Peso estadounidense.
Kg	:	Kilogramos.
KPI	:	Key Performance Indicators
Kp/in ²	:	kilopond per Square Inch
t _{rd}	:	Lectura de espesor en la zona uniforme respecto a la zona de perdida de metal.
t _{am}	:	Espesor promedio medido (average measured thickness)
t _{am} ^S	:	Espesor promedio medido en el plano longitudinal (s) en que se realizó la lectura de inspección de CTPs.
t	:	Toneladas

INTRODUCCIÓN

El mantenimiento industrial es un pilar fundamental en la gestión de activos dentro de cualquier industria, y su importancia se acentúa en sectores donde la continuidad operativa y la seguridad son críticas. En el sector forestal y de celulosa en Chile, la confiabilidad de los equipos estáticos es determinante para mantener la eficiencia productiva. Chile es uno de los mayores productores mundiales de celulosa, con una producción que representa el 1.6% del PIB nacional, alcanzando los 3.373 mil millones de pesos (aproximadamente USD 3,507.92 millones). A lo anterior se añade el aporte del sector al empleo, donde en 2022, generó aproximadamente 267.500 empleos directos y 160.500 empleos indirectos, sumando un total de 428.000 puestos de trabajo (Forestal, Ch. 2023).

El caso que abordan las siguientes páginas, trata de un estanque de clarificación empleado en el proceso de clarificación de licor verde dentro de un complejo industrial de producción de celulosa en la región del Bío-bío. El equipo instalado en la línea de caustificación, tiene una capacidad de almacenamiento de 3.650 [m³/día] a 5.150 [m³/día] de licor verde crudo.

El licor verde almacenado por el equipo es una solución química llamado smelt (sulfuro de sodio (Na₂ S) y carbonato de sodio (Na₂ CO₃)) mezclado con agua; esta solución química se obtiene desde la línea de recuperación y energía, la cual que entrega un caudal de 170 [m³/h] de licor verde hacia el tanque de almacenamiento. El tanque por evaluar está constituido por 7 anillos, y cuyos espesores actuales del 4º anillo están fuera de los rangos admisibles por la norma API 650, según el último informe de inspección realizado sobre el estanque.

A lo largo de este documento, la norma ASME FFS-1/API 579 proporcionará métodos de ingeniería cuantitativos prácticos y precisos para evaluar la integridad mecánica del tanque clarificador N°2 en su 4to anillo que permitan determinar su continuidad operacional y evaluar propuestas de mantenimiento que aseguren la función operativa del equipo en forma segura y confiable.

Los hallazgos sobre el equipo fueron evaluados como dicta la normativa API 579: desde su mecanismo de deterioro (corrosión en la superficie bajo aislamiento, CUI y corrosión interna) y considerando parámetros claves como el área afectada total en la superficie del manto cilíndrico, que corresponde a 80.2 [m²]. De lo anterior se propusieron dos escenarios de intervención basados en la vida remanente del activo: mantenimiento correctivo diferido (según condición), y mantenimiento preventivo por sustitución.

Mantener altos estándares de mantenimiento no solo es una exigencia técnica, sino también una necesidad económica y productiva. El cumplimiento de normativas internacionales como ASME FFS-1/API 579 permite gestionar el mantenimiento uniendo los principales aspectos ingenieriles de diseño e inspección en equipos industriales. De esta manera es posible implementar metodologías de evaluación basadas en condición, con las cuales desarrollar propuestas de mantenimiento predictivo y correctivo, optimizando costos y minimizando riesgos operacionales.

OBJETIVO GENERAL

Realizar una evaluación de la integridad mecánica de un tanque atmosférico que presenta zonas de adelgazamiento del sector forestal, en base a la normativa ASME FFS-1/API 579, para proporcionar respaldo técnico en las decisiones de mantenimiento, inspección y puesta en servicio del equipo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar información sobre el contexto operacional del tanque de almacenamiento de licor verde, definiendo la metodología de la norma ASME FFS-1/API 579 y su implementación sobre el activo mencionado.
- Aplicar la normativa ASME FFS-1/API 579 desde la evaluación o parte correspondiente, definiendo una propuesta técnica (acciones de mejora y/o mitigación) en concordancia a la normativa aplicada.
- Desarrollar la propuesta técnica considerando un análisis económico, los resultados consolidados de la evaluación FFS-1, y verificando la viabilidad de su implementación.

**CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DEL CONTEXTO OPERACIONAL Y
METODOLOGÍA**

1. CONTEXTO OPERACIONAL Y METODOLOGÍA

Este capítulo abordará la problemática y hallazgos de inspección realizados sobre un tanque de almacenamiento de la línea de caustificación de una empresa del sector forestal.

Para lo anterior, se recopilará información sobre el contexto operacional de la empresa, las etapas del proceso en que está involucrado el equipo, y los principales aspectos ingenieriles de diseño del mismo. Se concluye el capítulo definiendo la metodología a implementar en pos de abordar la problemática y los hallazgos sobre el equipo.

1.1. DESCRIPCIÓN DE EMPRESA Y PLANTA

Se trata de una empresa del sector forestal dedicada a la fabricación de pulpa de *celulosa* y derivados como madera aserrada y paneles.

La empresa cuenta con una red de ventas basado en un sistema global de logística que cubre: el transporte, carga - descarga, almacenamiento y distribución. En total, la empresa posee capacidad de producción anual de 3,9 millones de toneladas de celulosa blanqueada y sin blanquear al año, y está presente en 5 continentes (Europa, Asia, África, Oceanía, sud-américa) abarcando más de 75 países y sobre 3.500 clientes (Arauco, R. 2022).

Respecto a la materia prima empleada, la empresa gestiona su propio patrimonio forestal tanto a nivel nacional, como en Argentina, Brasil y Uruguay bajo prácticas de gestión forestal responsable. De esta manera la empresa ha declarado un total de 404 mil [ha] de bosques de pino y 189 mil [ha] de bosques de eucaliptus en Chile (Arauco, I. 2023).

La planta de fabricación de celulosa posee 3 áreas principales: *línea de fabricación de celulosa* (cocción y pulpeo), *línea de recuperación* y *línea de tratamiento de smelt* (Tran y Vakkilainen. 2022).

1.1.1. Línea de fabricación de Celulosa

Desde el punto de vista químico, la celulosa es un polímero natural abundante en la madera (biopolímero) formado por unidades de glucosa. Las fibras en la madera están unidas entre sí por la lignina.

La planta procesadora utiliza un método conocido como *pulpeo Kraft* o *pulpeo al sulfato*, proceso químico que separará las fibras de la lignina utilizando un compuesto llamado *licor blanco*. Este método es ampliamente utilizado en la industria a nivel mundial para la producción de pulpa de celulosa y posterior fabricación de papel (Tran y Vakkilainen. 2022).

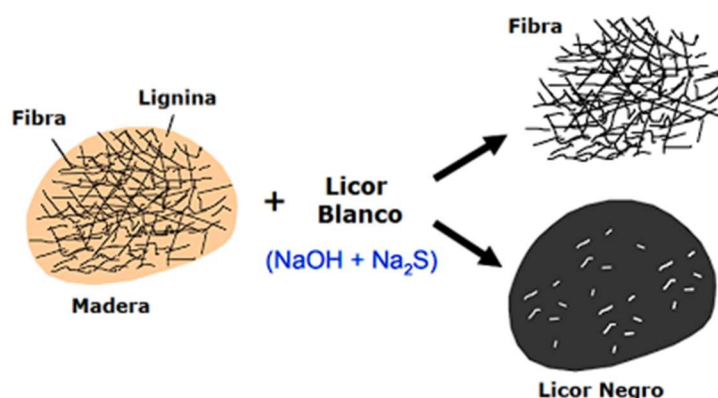


Figura 1. Método de pulpeo Kraft o al sulfato
Fuente: Tran y Vakkilainen. (2022).

Como se muestra en la figura 1, el pulpeo Kraft permite extraer la lignina de las fibras de madera a través del uso de licor blanco: una mezcla de hidróxido de sodio (NaOH) y sulfuro de sodio (Na₂S). Esta *etapa de licor blanco* se lleva a cabo dentro de grandes recipientes presurizados llamados *digestores*.

1.1.2. Línea de recuperación y energía

Esta línea está dedicada al tratamiento del *licor negro* proveniente desde los digestores en la línea de fabricación de celulosa. En esta línea el licor negro será separado de los residuos de lignina para obtener la mayor concentración de sólidos posible denominados *air dry solids* (ADs).

Lo anterior es fundamental en la gestión de eficiencia energética de la planta celulosa ya que la concentración de sólidos será utilizada como biocombustible.

Este licor negro concentrado posee un contenido calorífico de entre 13,5 y 14,5 [MJ/kg] de sólidos que permite generar 1115 [t/h] de vapor a través de calderas de recuperación y colectores de alta presión. El vapor a alta presión resultante alimenta a 2 turbogeneradores para finalmente producir un total de 204,9 [MW] energía eléctrica y 100,4 [MW] de excedentes para alimentar zonas aledañas (Arauco C. 2024).

1.1.3. Caustificación y tratamiento del smelt

Esta línea permite cerrar el circuito de sustentabilidad energética de la planta. Los residuos y sólidos del proceso de la línea de recuperación son extraídos desde las calderas de recuperación para producir smelt. El smelt resultante será mezclado con agua para producir licor verde, el cual se envía a tanques de almacenamiento.

La formación de licor verde permite obtener finalmente licor blanco, clave en la producción de celulosa y en la producción completa de la planta (Tran y Vakkilainen. 2022).

1.1.4. Productos principales y sub productos

Esta planta produce 2.100.000 toneladas anuales de celulosa cuyo tratamiento genera licor verde en una proporción aproximada de 1:3 (por cada tonelada de celulosa producida, la tercera parte de ella se trabaja en la obtención de licor verde)

Productos principales:

- Pulpa de celulosa: altamente resistente y se utiliza para fabricar una amplia gama de productos de papel.
- Papel kraft: utilizado en bolsas, embalajes y sacos resistentes.
- Cartón corrugado: para cajas de embalaje.
- Papel para impresión y escritura, Papel tisú, Cartulinas.

Productos secundarios:

- Licor negro: Es un subproducto rico en lignina y utilizado como fuente de energía (biocombustible) en las propias fábricas de papel al quemarlo en calderas, lo que genera vapor y electricidad.
- Trementina: Es una mezcla de hidrocarburos que se destila del licor negro. La trementina se utiliza en la fabricación de pinturas, solventes
- Lignina: Un subproducto del proceso que se puede extraer del licor negro. Tiene múltiples usos, como: Aditivos para el concreto, producción de productos químicos, fertilizantes y productos agrícolas.

1.2. **PROBLEMÁTICA Y ANTECEDENTES DEL EQUIPO**

La problemática del cliente (empresa forestal), se encuentra en uno de los 2 tanques clarificadores de licor verde utilizados la línea de *caustificación y tratamiento de smelt* de la planta celulosa.

En base a un informe de inspección programada, se detectaron mediciones de espesor significativamente inferiores al espesor admisible por norma en el anillo N°4 del manto del tanque clarificador.



Figura 2. Zona de corrosión adyacente al parche de refuerzo.

Fuente: Registro fotográfico OT, Anillo N°4

Respecto a las mediciones se debe indicar qué:

- Fueron realizadas con técnica ultrasonido (UT).
- Las mediciones se realizaron cada 100mm de forma vertical ascendente. Tomando como referencia las uniones soldadas horizontales.
- Se midió el equipo en 5 ejes (0° – 90° – 180° – 270° – 315°) por el exterior.
- *El eje de 180° posee un parche calzado, que cruza todos los anillos. Fue instalado en el año 2010 y fue fabricado con 12,5 [mm] de espesor nominal.*



Figura 3. Vista de eje 180° del tanque Clarificador N°2

Fuente: Registro fotográfico OT

ANILLO 4	PARCHE CALZADO	ESPESOR NOMINAL 12,5mm	Niveles	0°	90°	180°	270°	315°
			1	6,6	6,8	10,7	6,5	6,6
			2	6,3	6,4	10,7	6,5	6,3
			3	6,2	6,2	10,5	6,5	6,5
			4	5,5	5,7	11,3	6,0	5,6
			5	5,7	5,5	11,7	5,8	5,9
			6	5,6	5,8	11,2	5,5	5,6
			7	5,8	6,2	11,2	5,9	6,0
			8	6,2	6,5	10,8	6,0	6,2
	ESPESOR NOMINAL 14mm		9	6,5	6,6	10,6	6,5	6,3
			10	6,4	9,4	11,1	9,7	9,6
			11	9,6	10,3	11,8	9,9	10,1
			12	11,6	11,5	12,1	11,4	11,9
			13	12,5	12,8	12,2	12,0	11,5
			14	12,9	13,0	13,2	11,8	12,6
			15	13,3	13,4	13,0	12,1	13,2

Figura 4. Lecturas anillo 4.

Fuente: Informe de inspección TAG 253-022-200

Como se muestra en la **figura 4**, las lecturas obtenidas sobre el anillo N°4 durante la inspección, bordearon los 5.5[mm] a 6.0[mm] de espesor en los 4 ejes adyacentes al parche calzado.

La norma API 650 (API 650, 2013) especifica que, para un estanque de almacenamiento sometido a presión atmosférica, con 26 [m] de diámetro, 6[m] de altura desde su base y de material Acero ASTM A285 Gr C, el espesor mínimo admisible debe ser 5.5[mm]

Es común que el operador (empresa) fije un espesor mucho mayor para trabajar en terreno, estableciendo para este caso un valor nominal de 14.5 [mm] de espesor nominal.

Si llevamos estos espesores medidos al espesor nominal de 14 [mm] solicitado por el operador, el anillo presenta un adelgazamiento de 6[mm] a 7[mm] por debajo de los rangos exigidos. Esto evidencia que el límite establecido por norma ya se ha alcanzado, y está fuera de los rangos admisibles para operar.

La **tabla 1** permite apreciar con más detalle la condición del anillo respecto a los rangos solicitados por el operador (cliente) y al espesor mínimo admisible por norma:

Tabla 1. Mapa de calor Anillo 4. Fuente: Autor, basado en informe.
Fuente: Registro de datos de informe en plantilla Excel.

Eje Niveles	0°	90°	180°	270°	315°
1	6,6	6,8	10,7	6,5	6,6
2	6,3	6,4	10,7	6,5	6,3
3	6,2	6,2	10,5	6,5	6,5
4	5,5	5,7	11,3	6,0	5,6
5	5,7	5,5	11,7	5,8	5,9
6	5,6	5,8	11,2	5,5	5,6
7	5,8	6,2	11,2	5,9	6,0
8	6,2	6,5	10,8	6,0	6,2
9	6,5	6,6	10,6	6,5	6,3
10	6,4	9,4	11,1	9,7	9,6
11	9,6	10,3	11,8	9,9	10,1
12	11,6	11,5	12,1	11,4	11,9
13	12,5	12,8	12,2	12	11,5
14	12,9	13	13,2	11,8	12,6
15	13,3	13,4	13	12,1	13,2

Leyenda	$t_{\text{admisible}} = 6 \text{ [mm]}$
	$t_{\text{medido}} \geq 90\% \cdot t_{\text{nominal}}$
	$t_{\text{medido}} < \text{al } 65\% \cdot t_{\text{nominal}}$
	$t_{\text{medido}} \leq t_{\text{admisible}}$

El resto de las mediciones sobre los demás anillos (7 anillos en total), mostraron una condición aceptable cercana a los valores nominales fijados por la empresa, por lo que no fueron considerados.

A modo de ejemplo, en la **figura 5** se muestra el anillo N°6 donde se observan condiciones aceptables de lecturas de espesor, destacadas en azul. Estas condiciones deben ser iguales o mayores a los 10 [mm] de espesor nominal solicitado por el operador (empresa) y un mínimo admisible exigido por norma de 5 [mm] (API 650, 2013).

ANILLO 6	ESPESOR NOMINAL 10mm	Niveles	0°	90°	180°	270°	315°
		1	10,0	10,5	10,2	10,4	10,0
		2	10,0	10,2	10,3	10,0	10,2
		3	10,0	10,4	10,1	10,2	10,0
		4	10,1	10,4	10,2	10,5	10,3
		5	10,1	10,6	10,4	10,2	10,2
		6	10,1	10,8	10,5	10,2	10,0
		7	10,0	10,7	10,3	10,0	10,4
		8	10,0	10,6	10,2	10,2	10,4
		9	10,3	10,5	10,1	10,2	10,4
		10	10,1	10,6	10,4	10,2	10,4
		11	10,2	10,5	10,5	10,2	10,4
		12	10,1	10,6	10,2	10,2	10,4
		13	10,1	10,4	10,3	10,3	10,4
		14	10,1	10,4	10,4	10,2	10,4
		15	10,1	10,3	10,3	10,1	10,5
		16	10,1	10,4	10,5	10,1	10,6
		17	10,1	10,3	10,4	9,9	10,6
		18	10,2	10,6	10,4	9,9	10,2

Figura 5. Condición aceptable de espesor nominal.

Fuente: Informe de inspección TAG 253-022-200

1.2.1. Observaciones sobre hallazgos en el equipo

De acuerdo con las mediciones hechas sobre el manto del estanque y al posterior informe de inspección, se observan las siguientes problemáticas:

- Pérdida de espesor considerable en anillo 4 del tanque clarificador N°2, presentando espesores cercanos y/o menores a 6[mm] (ver figura 7 y tabla 2).
- Los puntos medidos en el eje longitudinal de 180° desde el nivel 1 al 15, donde se encuentra el parche calzado, presentan cierta pérdida de espesor por CUI, pero es despreciable respecto los otros hallazgos de adelgazamiento.

En cuanto a los mecanismos de deterioro y modos de falla detectados, se observa lo siguiente:

- Corrosión externa: este mecanismo de deterioro es consecuencia directa de alta humedad y salinidad que existe en la ubicación geográfica de la planta celulosa (zona costera de Arauco, Región del Biobío)
- Corrosión bajo aislamiento, aunque es un mecanismo de deterioro presente en los parches calzados que se instalaron en 2010, no afecta significativamente la correcta operación del activo.
- Pérdida de metal generalizada; adelgazamiento (thinning) o erosión de la superficie externa del manto.
- Riesgo de fuga de líquido corrosivo y/o deformación estructural.

1.3. IDENTIFICACIÓN DE EQUIPO EN PLANTA

EL tanque clarificador N°2 puede ser identificado de acuerdo con la estructura taxonómica del sistema (fábrica) y en concordancia a la norma ISO 14224:2016:

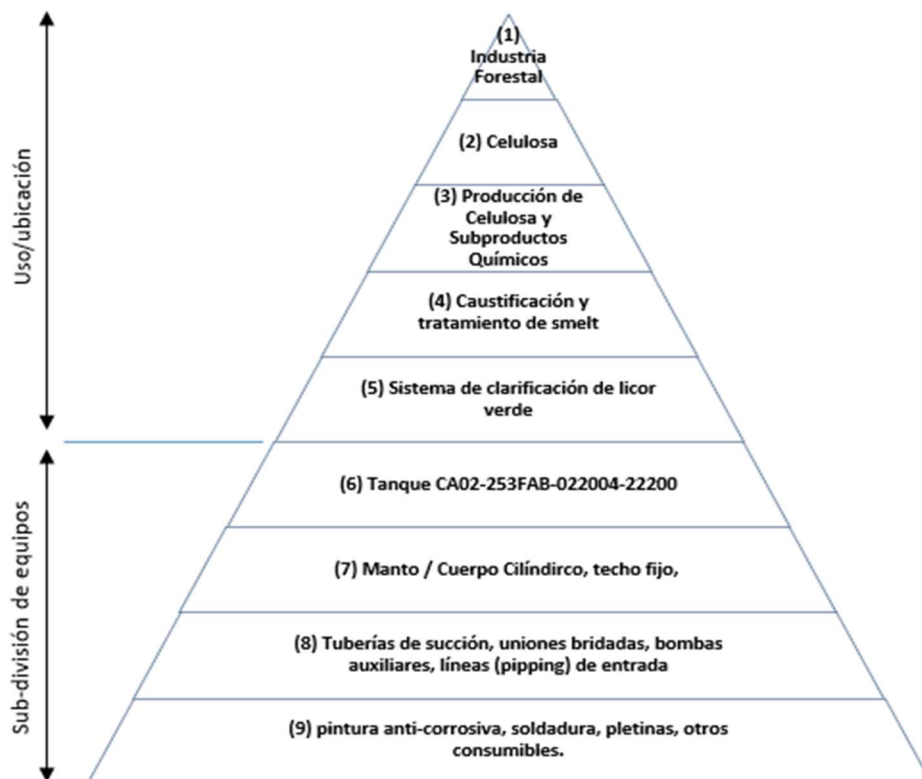


Figura 6. Estructura taxonómica

Fuente: Elaborado a partir de norma ISO 14224:2016

De acuerdo con la norma ISO, se pueden identificar en el nivel 6 los tanques de almacenamiento a presión atmosférica API 650.

En la taxonomía de la [figura 6](#) podemos identificar el sistema de clarificación y almacenamiento de licor verde como parte del *nivel 5*. Ya en el *nivel 6* observamos el tanque clarificador N°2, el cual ha sido nombrado como CA02-253-FAB-0220004-22200, según configuración de planta en la empresa, donde:

- CA02 : Línea N°2 de clarificación de licor.
- 253 : Área de caustificación
- FAB : Sistema de almacenamiento / estructura
- 02204 : Subsistema / cuerpo o manto
- 22200 : Ítem/equipo mantenible

Finalmente, nivel 7 observamos el ítem mantenible para este equipo que corresponde al cuerpo o manto con los anillos que los conforman.

1.3.1. Funciones

La **función primaria** del tanque CA02-253-FAB-0220004-22200 en su contexto operacional, es almacenar 3.650 [m³/día] a 5.150 [m³/día] de licor verde crudo. Este licor verde es una solución química llamado *smelt* (sulfuro de sodio (Na₂ S) y carbonato de sodio (Na₂ CO₃)) mezclado con agua, proveniente de una línea de recuperación y energía, la cual que entrega un caudal de 170 [m³/h] de dicha solución química hacia el tanque de almacenamiento.

1.3.2. Contexto Operacional

En la Figura 7 se observa la disposición del sistema de producción de celulosa y sus ciclos, indicando las funciones primarias de las distintas líneas de la planta, que participan en el proceso de la fabricación de celulosa y licores.

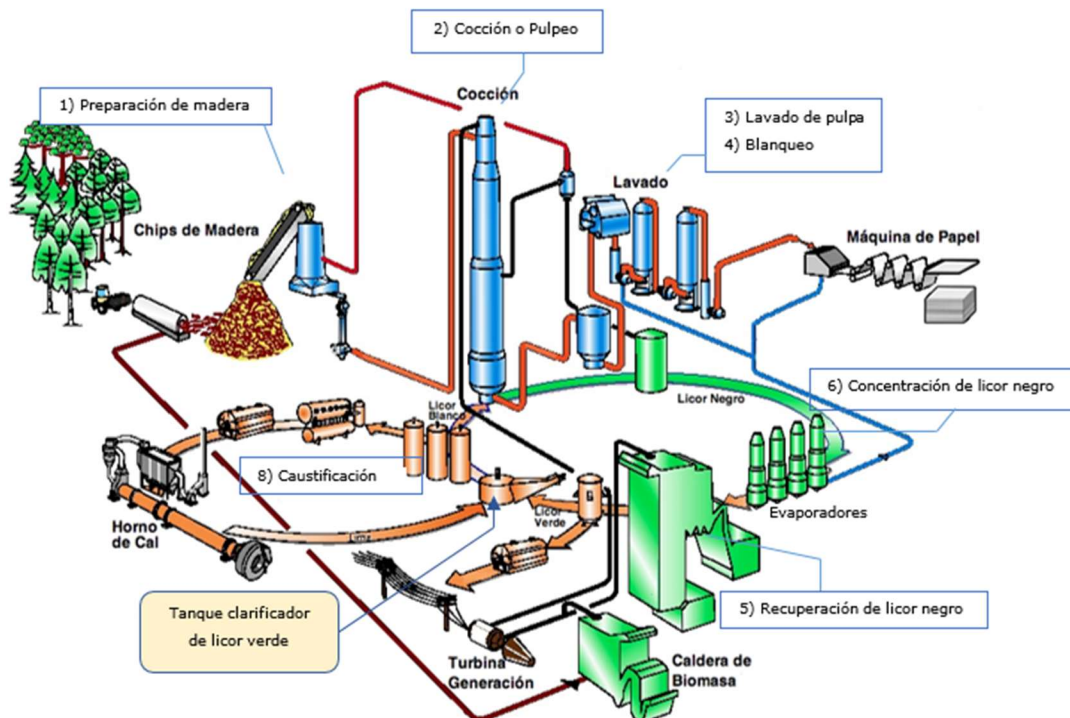


Figura 7. Diagrama del ciclo de producción y equipo.

Fuente: web, Wikipedia.

Se pueden identificar 9 procesos en ciclo completo de producción de celulosa:

1. Preparación de la madera: una vez recepcionada y descortezada, la madera ingresa a la primera etapa de la planta donde las astillas se seleccionan según el tamaño y se almacenan para su procesamiento en un *digestor continuo*.
2. Cocción o pulpeo (Digestión): Las astillas de madera se introducen en el digestor junto con una mezcla de productos químicos denominada *licor blanco*,

que es un compuesto de Hidróxido de sodio (NaOH) y Sulfuro de sodio (Na₂S), y con el cuál se disolverá la lignina de la celulosa.

De estas etapas se obtendrá celulosa y licor negro. El licor negro contiene ahora impurezas disueltas de la madera (principalmente lignina) y los productos químicos del proceso. Continuando el ciclo de la pulpa:

3. Lavado y depuración: La pulpa de celulosa, es separada del licor negro, y se procede a lavar para eliminar cualquier residuo de licor remanente.
4. Blanqueo: La pulpa será blanqueada para producir papel blanco, usando 3 productos químicos: dióxido de cloro, oxígeno y peróxido de hidrógeno. Eliminando por completo todo residuo de lignina presente.

Ya finalizado el ciclo de la pulpa de celulosa, se continúa al tratamiento del licor negro:

5. Concentración y combustión del licor negro: Mediante evaporadores, el licor negro se concentra para reducir su contenido de agua y aumentar la concentración de sólidos (ADs).
6. Recuperación del licor negro: En la caldera de recuperación, los compuestos inorgánicos del licor negro (carbonato de sodio y el sulfuro de sodio) son recuperados en forma de una mezcla fundida llamada *smelt*.

El licor negro será entonces utilizado como biocombustible en turbogeneradores, generando vapor y electricidad.

El smelt por su parte, será enviado a la *línea de recuperación y energía*, proceso clave en la obtención de licor blanco:

7. Smelt y Licor verde: El smelt que se extrae de la caldera de recuperación se disuelve en agua para formar el licor verde.

El licor verde es un paso intermedio en la regeneración de licor blanco para la etapa de cocción.

8. Caustificación: El licor verde se lleva a un proceso de caustificación, donde se le añade cal (CaO) para convertir el carbonato de sodio (Na₂CO₃) en hidróxido de sodio (NaOH), regenerando así el licor blanco necesario para el proceso de cocción. La reacción de caustificación genera carbonato de calcio (CaCO₃).
9. Reutilización del licor blanco: El carbonato de calcio (CaCO₃), conocido como lodo de cal, se calienta en un horno de calcinación para regenerar la cal viva (CaO), que se reutiliza en la caustificación, obteniendo licor blanco y cerrando el ciclo de regeneración de productos químicos.

Una vez regenerado, el licor blanco se reintroduce en el proceso de digestión para cocinar nuevas astillas de madera, cerrando así el ciclo autosustentable del proceso kraft.

1.3.3. Aspectos específicos

El manto del tanque de almacenamiento posee una capacidad máxima de 6100 [m³] con un diámetro de 26 [m], y fabricado de material Acero ASTM A285 Gr C, el cual debe soportar una presión interna en que la presión del líquido que contiene sea aproximadamente equivalente a la atmosférica. Esto de acuerdo con estándares de diseño, construcción y mantenimiento indicados por la norma API 650 (API 650, 2013).

Como se indicó anteriormente, el estanque clarificador API 650 a evaluar, es utilizado en la línea de caustificación y tratamiento de smelt de la planta de celulosa, para almacenamiento de licor verde.

El diagrama a continuación ilustra en forma esquemática el ciclo de caustificación donde se encuentran instalados los 2 tanques clarificadores.

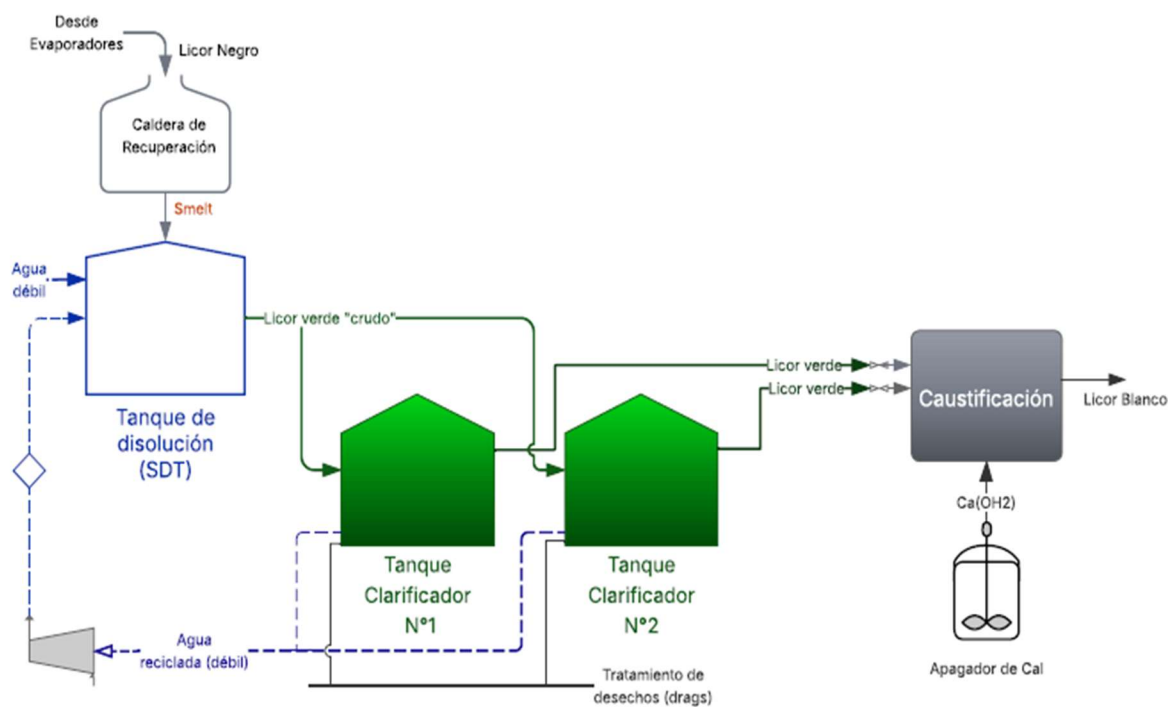


Figura 8. Diagrama de disposición del sistema

Fuente: Datos empresa forestal; Arauco C., 2024; Tran y Vakkilainen. 2022

En este diagrama. Se incluyen las principales etapas en las que está involucrado el tanque clarificador N°2: caldera de recuperación, tanque de disolución (smelt dissolving tank), clarificador y almacenamiento de licor verde, circuito de cal (caustificadores), y el reciclaje de químicos.

1.4. **TANQUE ATMOSFÉRICO**

El tanque atmosférico es un tipo de equipo estático cuya función primaria es almacenar o procesar fluidos, previo o posterior a algún proceso industrial determinado.

El diseño operacional de un tanque atmosférico se basa en la norma API 650, y su función requerida es soportar una presión interna en que la presión del vapor del líquido que contiene es aproximadamente equivalente a la atmosférica.

Los tanques diseñados bajo la norma API 650 están específicamente diseñados para el almacenamiento de líquidos. Están contruidos por acero al carbono (una aleación de acero), y de acuerdo con su técnica de construcción, son remachados, soldados y atornillados.

Estos tanques son ampliamente utilizados en la industria para almacenar una variedad de líquidos, como:

- Petróleo crudo.
- Productos refinados de petróleo (gasolina, diésel, queroseno, etc.).
- Productos químicos.
- Agua.
- Subproductos (licores) del procesamiento de celulosa.

Dadas sus diversas aplicaciones según las necesidades del operador, los tanques son contruidos de diferentes tipos, tamaños y materiales. Se clasifican según su techo en:

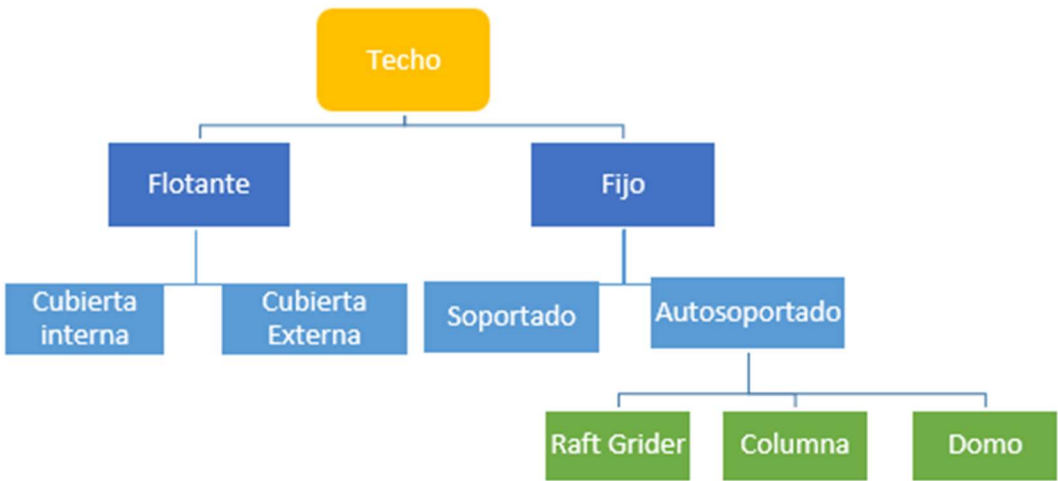


Figura 9. Clasificación Tanques Atmosféricos
Fuente: API 650 Standard (2020).

Suelen ser de forma cilíndrica, resistentes y de fabricación económica. Y según el fluido que contengan, pueden estar completamente cerrados o no tener techo.

De esta manera, el tanque atmosférico a evaluar se define desde su contexto operacional, como un *tanque api 650 de techo fijo auto soportado, tipo Rafter girder*.

1.4.1. Aspectos Teóricos Principales

Todas las especificaciones ingenieriles desde la construcción del equipo hasta su inspección y aptitud para el servicio se sujetan a teorías de esfuerzo o falla, desarrolladas a través de los años por medio de ensayos de esfuerzos estáticos y por supuesto, modelamientos físico-matemáticos complejos.

Estas teorías de esfuerzos o falla varían según el criterio y método utilizado, sin embargo, siempre apuntan al mismo objetivo: cuantificar la resistencia mecánica de determinado material para un componente o estructura que soportará dichos esfuerzos.

Debido a lo anterior, es posible clasificar la falla según el comportamiento de la fuerza que actúa sobre dicho componente o material de estudio, obteniendo grandes grupos: dinámicas y estáticas.

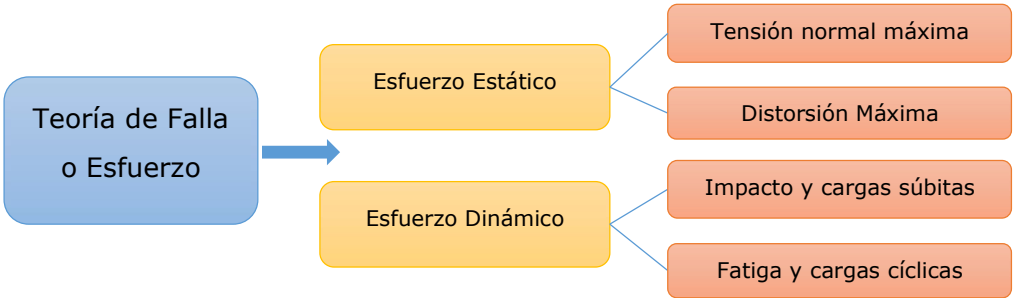


Figura 10. Aspectos principales de la Teoría de falla.

Fuente: Elaborado a partir de Russel C. Hibbeler, 8va edición.

1.4.2. Parámetros de Diseño

Los parámetros de diseño permiten definir las directrices de inspecciones y mantenimiento sobre el equipo basándose en la teoría de falla para esfuerzos estáticos.

Más específicamente, estos parámetros se construyen desde la teoría de distorsión máxima de Von-mises presente en materiales dúctiles, pero también se consideran esfuerzos en materiales frágiles (tracción y compresión máxima) para ciertos mecanismos de deterioro presentes en equipos estáticos.

De esta manera, el diseño de un recipiente industrial se basa en la siguiente relación presión interna – pared cilíndrica – resistencia del material:

$$t_d = \frac{PD}{2S_d}$$

Ecuación 1.

La forma genérica de Barlow es la ecuación de esfuerzo longitudinal para un cilindro de tipo pared delgada, determinando un espesor mínimo admisible de diseño t_d , expresado

en [mm]. La presión (**P**) ejercida por el fluido, y de acuerdo con el principio de Pascal, se transmite de manera uniforme sobre el estanque a presión atmosférica. La resistencia a la falla del material de la estructura es conocido como esfuerzo admisible (**S_d**).

En estanques atmosféricos, debe considerarse la energía potencial del fluido contenido, actuando estáticamente sobre el recipiente y su estructura, a presión atmosférica.

$$P = \frac{\gamma}{\rho \cdot g \cdot h} \quad \text{Ecuación 2.}$$

Donde:

- P = Presión. expresada en pascales [$\frac{N}{m^2}$].
- ρ = Densidad del fluido. En este caso, se considera 1000 [$\frac{Kg}{m^3}$].
- g = Aceleración de gravedad en $\frac{m}{s^2}$.
- h = Altura del fluido. Expresada en m .
- γ = $\rho * g$; Gravedad específica del fluido. Adimensional.

De esta manera, a la formula genérica de Barlow se añadió la densidad (P) del fluido, el valor de la aceleración de gravedad (g) y la altura de la columna del líquido (H), en reemplazo de P (presión):

$$t_{\min} = \frac{4.9HDG}{SE} \quad \text{Ecuación 3.}$$

1.4.3. Diseño, Inspección y Gestión del Mantenimiento

La norma API (American Petroleum Institute) y ASME (American Society of Mechanical Engineers) son las utilizadas para el diseño, inspección, mantenimiento y retorno al servicio del equipo estático analizado en esta sección.

Para efectos de un estanque de secciones/anillos de acero soldados, la API y ASME proporciona las siguientes especificaciones:

Tabla 2. Normativa y criterios
Fuente: Elaboración propia desde normas citadas.

Aplicabilidad	Normativa	Criterios Principales
Diseño y Construcción	API 650	Diseño y requisitos de fabricación, cargas a soportar, materiales, soldadura-uniones
Mantenimiento, reparación, modificaciones	API 653	Requisitos mínimos para el mantenimiento y confiabilidad a mediano plazo
Evaluación de daños e integridad mecánica	ASME FFS-1/API 579	Evaluación de daños, antecedentes operativos y análisis de aptitud para continuar en servicio
Gestión del mantenimiento a largo plazo	API 580/581	Inspección basada en riesgo (RBI), RUL y confiabilidad a mediano y largo plazo

1.5. OBSERVACIONES Y METODOLOGÍA

La problemática descrita en la [sección 1.2](#) de este capítulo, requiere ser abordada en el corto plazo para garantizar la función operativa del equipo.

Es necesario plantear la metodología de intervención desde los criterios de normativas vigentes y escogiendo una metodología que permita demostrar la integridad estructural del equipo dañado, cuyos criterios permitan evaluar cuantitativamente si el equipo se encuentra o no apto para su retorno al servicio.

Aquella norma que cumple lo planteado en el párrafo anterior, corresponde a la ASME FFS-1/API 579. A través de la normativa ASME FFS-1/API 579, se podrá efectuar una evaluación cuantitativa en el equipo dañado, proporcionando un enfoque técnico para maximizar la seguridad, la eficiencia operacional, junto con optimizar los costos de mantenimiento y evitar el reemplazo del equipo.

CAPÍTULO 2: APLICACIÓN DE NORMATIVA ASME FFS – 1 / API 579 Y PROPUESTA TÉCNICA

2. APLICACIÓN DE NORMATIVA ASME FFS – 1 / API 579 AL EQUIPO

Se abordará la problemática de los aspectos estructurales del equipo, según la metodología que ofrece la norma API 579/ASME FFS-1.

De acuerdo con lo anterior, se presentará la norma y sus principales aspectos para posteriormente implementar los criterios de evaluación de integridad mecánica al tanque clarificador identificando: mecanismo de daño, tipo de evaluación, criterios, y desarrollo de la metodología correspondiente.

2.1. ASME FFS-1 / API 579 FITNESS FOR SERVICE

La norma *ASME FFS-1 / API – 579 Fitness for service (FFS)* proporciona métodos de ingeniería cuantitativos para la evaluación de integridad mecánica de equipos estáticos y la aptitud de estos para continuar o no en servicio.

Existe una variedad amplia de estándares reconocidos y parámetros de diseño que pueden ser evaluados desde la norma FFS dada su metodología (basada en el esfuerzo admisible y de fluencia), los principales estándares son:

- ASME B31.3. Tuberías de proceso.
- ASME BPVC, Sección VIII, División 1 y 2
- ASME BPVC, Sección I.
- API 650. Tanques atmosféricos.

2.3.1. Evaluaciones FFS y mecanismos de daño

El estándar FFS provee en total *11 secciones FFS o partes de evaluaciones (assessments parts)* en total basados en el tipo de mecanismo de daño y/o defecto de material (flaws) presente en el equipo a inspeccionar (Ver tabla 2).

Estas evaluaciones FFS permitirán determinar:

- En qué condiciones de operatividad se encuentra el equipo,
- si esas condiciones de operatividad son adecuadas o no para continuar en producción,
- bajo qué programas de mantenimiento o inspección debe continuar operando,
- si se requiere un reacondicionamiento para el retorno al servicio del equipo.

Tabla 3. Evaluaciones del estándar FFS

Fuente: Elaborado a partir de API 579-1/ASME FFS-1 parte 1.

Sección FFS	Mecanismos de daño y defectos (flaws)	Contenido
Parte 3	Fractura frágil en equipos	Evaluación de resistencia a la fractura frágil en equipos de acero al carbono y aleaciones de acero.
Parte 4	Perdida de metal (corrosión) generalizada	Evaluación basada puntos de lectura de espesor (PTR) o perfiles de espesor más detallados (CTR).
Parte 5	Perdida de metal (corrosión) localizada	Evaluación de adelgazamiento localizado y adelgazamiento lineal en forma de ranuras (para componentes presurizados). Se requieren perfiles de espesor detallados (CTR).
Parte 6	Daño por picaduras	Evaluación para picaduras dispersión generalizada, picaduras localizadas, picaduras que ocurren dentro de una región de pérdida de metal localizada
Parte 7	Daños inducidos por hidrógeno (HIC/SOHIC)	Pautas de evaluación de medición para ampolladuras/abrasiones causadas HIC/SOHIC en puntos específicos del equipo
Parte 8	Desalineación de soldadura y distorsiones	Evaluación de las tensiones resultantes en discontinuidades geométricas en cañerías, recipientes presurizados y atmosféricos.
Parte 9	Defectos similares a agrietamiento	Evaluación de defectos similares a grietas que provee factores de esfuerzo y recomendaciones de factores ambientales
Parte 10	Ponderación del daño a temperaturas altas y rango <i>creep</i>	Métodos de evaluación para determinar la vida útil remanente de un componente que opera bajo condición de termofluencia
Parte 11	Daños por incendio	Metodología para clasificar y seleccionar los componentes para su evaluación según la exposición al calor abrasivo experimentado durante un incendio.
Parte 12	Abolladuras, hendiduras y combinación de ambas	Evaluación de defectos provocados en zonas localizadas por compresión del material (hendidura) o por remoción/pérdida de material (abolladura)
Parte 13	Laminaciones	Evaluación de laminaciones de material en juntas de soldadura y discontinuidades estructurales, como transiciones de carcasa, uniones bridadas y boquillas.

- NOTA: En el **Anexo 1** se ilustra con imágenes cada sección FFS según su defecto o mecanismo de deterioro

Hay que considerar que los defectos (flaws) son modos de falla (no mecanismos de deterioro) y pueden ser inherentes al proceso de fabricación, surgir durante el servicio, o ser resultado de reparaciones previas.

2.3.2. Mecanismos de daño y flaws

En la **API 579-1/ASME FFS-1** se identifican los conceptos de "*flaws*" (*defectos*) y "*damage mechanisms*" (*mecanismos de daño*) los cuales tienen diferencias claras, permitiendo establecer una relación de causalidad entre ambos conceptos: Los mecanismos de daño son la causa, mientras que los defectos son el resultado visible de esos mecanismos.

Por tanto, es posible considerar los defectos como modos de falla. Un ejemplo práctico sería:

- **Defecto:** defecto similar a agrietamiento mediante inspección por ultrasonido.
- **Mecanismo de daño asociado:** Fatiga térmica causada por ciclos repetitivos de calentamiento y enfriamiento.
- **Enfoque FFS (general):** Aplicar la parte 9 de la evaluación, identificar la ubicación, tamaño y orientación de la grieta. Determinar si la grieta puede propagarse bajo las condiciones operativas. Evaluar la aceptabilidad de la grieta usando el Capítulo 9 (grietas) y considerando los efectos de la fatiga térmica.



Figura 11. Defecto (flaw) similar a agrietamiento.

Fuente: a partir de API 579-1/ASME FFS-1 parte 9.

En la figura 11 se puede apreciar la aparición de un *defecto (flaws)* similar a agrietamiento, que aún no se convierte en una grieta profunda o fractura (modo de falla), pero que está pronto a suceder si no se interviene. El *mecanismo de deterioro* para este ejemplo corresponde a corrosión bajo tensión mecánica (SCC, por sus siglas en inglés).

El Apéndice G de la norma ayuda a identificar los mecanismos de daño ("*damage mechanism identification*") y a asociar el tipo de flaw detectado al mecanismo subyacente.

2.3.3. Procedimiento general para evaluaciones

El estándar FFS lista 8 pasos principales para implementar una evaluación. Estos aplican para cada una de sus 11 partes de evaluación de integridad mecánica (sección 2.1.1.). En la tabla 5 se indican los detalles de cada paso.

Tabla 4. Pasos para una evaluación de integridad mecánica

Fuente: Elaborado a partir de API 579-1/ASME FFS-1 parte 1.

Pasos	Procedimiento	Descripción
1	Identificación del mecanismo de deterioro	El primer paso en una evaluación FFS es identificar el tipo de falla y la causa del daño. La norma proporciona un anexo con una descripción general de los mecanismos de daño para identificar sus causas.
2	Aplicabilidad y limitaciones	La aplicabilidad y las limitaciones del procedimiento de evaluación se describen en cada parte, con esta información se puede tomar una decisión si proceder o no con una evaluación.
3	Datos requeridos	Datos de diseño, información de mantenimiento, historial operativo y otros datos específicos relacionados al mecanismo de daño como el tamaño del defecto, el estado de esfuerzos en el componente, la ubicación y las propiedades del material
4	Técnicas de evaluación	Las técnicas de evaluación y los criterios de aceptación se proporcionan en cada parte si existen múltiples mecanismos de daño, puede ser necesario utilizar más de una parte para evaluación.
5	Vida remanente	La vida remanente se establece utilizando los procedimientos de evaluación de FFS con una estimación de daños futuros.
6	Remediación	Métodos de remediación se proporcionan en cada parte según el mecanismo de daño o el tipo de falla, en algunos casos las técnicas de remediación pueden usarse para controlar el daño futuro asociado con el crecimiento de defectos o deterioro de material.
7	Monitoreo	Los métodos para el monitoreo en servicio se proporcionan en cada parte, el monitoreo en servicio se puede usar para aquellos casos en los que no se puede establecer adecuadamente un intervalo de inspección o vida restante debido a la complejidad asociada al entorno en servicio
8	Documentación	La documentación debe incluir un registro de toda la información y las decisiones tomadas en cada uno de los pasos anteriores para calificar el componente para operación continua.

2.3.4. Criterios (Niveles) de evaluación

Existen 3 niveles aplicables a cada parte o evaluación FFS. Estos niveles dependerán de la experiencia del personal (técnico e ingeniero) sobre los equipos, la trazabilidad existente, y la complejidad del análisis requerido.

En la práctica del estándar FFS, suele aplicarse gradualmente cada nivel de evaluación comenzado desde el nivel 1. Si los resultados obtenidos no son aceptables según los criterios de la API 579/ASME FFS-1 para ese nivel, se debe:

- continuar al nivel siguiente,
- realizar nuevas lecturas de espesores y repetir el nivel,
- Definir una medida de mitigación (proponer tareas de monitoreo y/o MTTO.).
- Sacar de operatividad el equipo.

A continuación, se entregará mayores detalles de cada nivel:

- Nivel 1: Este nivel es el más conservador y de menor costo. Considera la información principal del equipo y no ahonda en datos específicos. Puede ser ejecutada por un inspector o ingeniero asignado.
 - Se basa en cálculos y procedimientos básicos de inspección visual y mediciones simples.
 - Se utiliza cuando los datos disponibles son limitados o no existe trazabilidad fiable.
 - El objetivo es determinar rápidamente si el equipo es seguro para seguir operando o si necesita una evaluación más profunda.
- Nivel 2: Involucra un análisis más detallado en comparación con el Nivel 1, debe ser realizado por el ingeniero especialista asignado.
 - Requiere una comprensión más detallada de los defectos, materiales, condiciones de operación, y puede incluir la aplicación de análisis de esfuerzos y deformaciones más complejos.
 - Se realiza cuando los resultados del Nivel 1 no son concluyentes o cuando se requiere mayor precisión.
- Nivel 3: Este nivel suele requerir especialistas en cálculo estructural y analistas con trayectoria. Es el más costoso, avanzado y detallado. Debe ser realizado por un ingeniero civil o especializado.
 - Requiere de estudios estructurales profundos, como el método de elementos finitos (FEA) o modelados avanzados en software para medir deformaciones en el manto del estanque.
 - Se utiliza para evaluaciones críticas, cuando se requiere realizar trabajos que no se encuentran normados o exigen un alto nivel de precisión sobre la integridad operativa del equipo.

2.2. PARÁMETROS DE EVALUACION Y LECTURAS DE ESPESOR

En cada uno de los 3 niveles de evaluación, se indicarán las principales mediciones y cálculos que permitirán determinar si es aceptable o no el criterio de la evaluación, según los resultados obtenidos a lo largo de los puntos de referencia de mediciones establecidos por la norma para las evaluaciones:

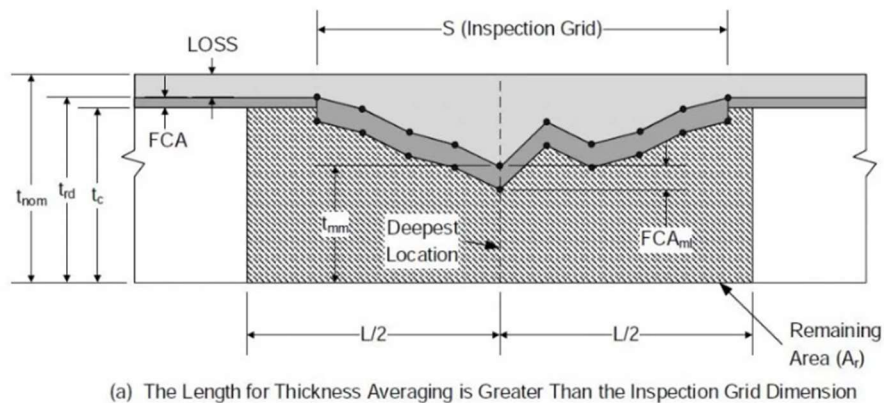


Figura 12. Principales puntos de referencia en la evaluación FFS

Fuente: Nomenclatura de lecturas de espesor, ASME FFS-1/API 579

Las lecturas de espesor realizadas en tanques atmosféricos deben ser siempre hechas en el plano longitudinal (meridional).

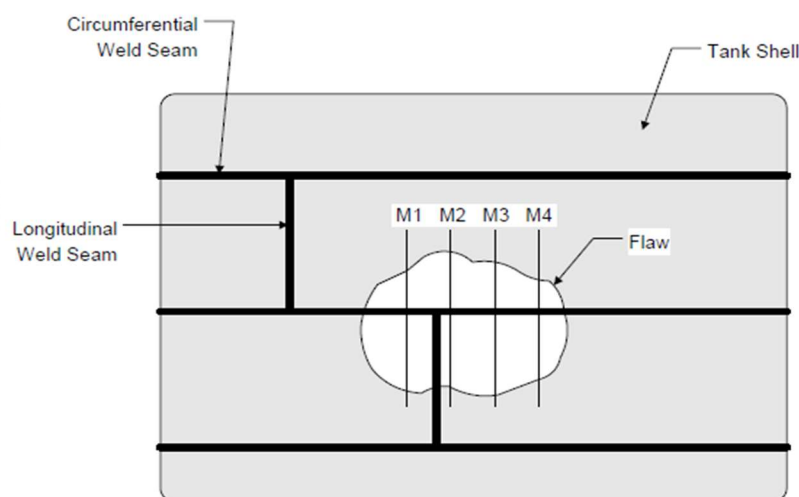


Figura 13. Orientación de unión o costura del tanque al medir.

Fuente: Lecturas de espesor, ASME FFS-1/API 579

2.3.1. Puntos de lectura de espesor (PTR)

Corresponde a los puntos de lectura de espesor, *point thickness readings* por sus siglas en inglés. Estos se utilizan para ejecutar una evaluación de corrosión generalizada (evaluación FFS parte 4), y requieren ser obtenidas sobre 15 PTRs para implementar esta técnica. Con ello se busca obtener la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación (COV), con lo que se proyecta estadísticamente la vida remanente del activo.

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

Ecuación 4.

$$COV \geq 0.1 ; \textit{No acceptable}$$

Ecuación 5.

Si el COV del total de PTR es mayor a 0.1 (10%), deberá cambiarse la técnica de medición para continuar la evaluación FFS, utilizando la técnica de perfil crítico de espesor (CTP).

2.3.2. Perfil de espesor (CTP)

El perfil critico de espesor (critical thicknes profile) se utilizan en evaluaciones para corrosión localizada en evaluaciones parte 5 y en algunos casos se utilizan en el marco de las evaluaciones parte 4 (corrosión generalizada). Una vez identificada la zona de corrosión, se procede a definir los espacios entre cada lectura del eje longitudinal:

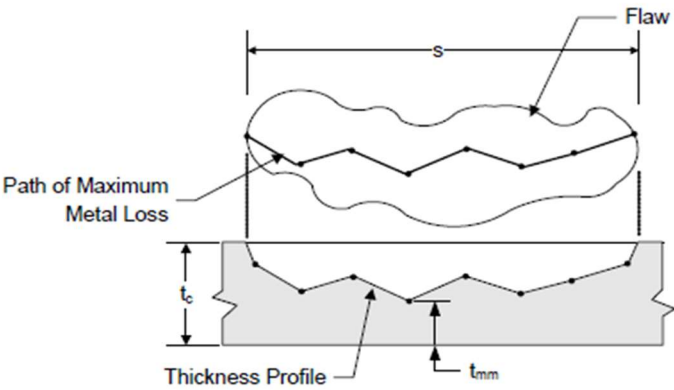


Figura 14. Defectos localizados en superficie. Fuente: Api 579
Fuente: Técnica de lecturas de espesor, ASME FFS-1/API 579

En caso de que existan zonas de corrosión localizada muy cercanas unas a la otra, se determina una longitud que abarque todas las zonas como una sola región, englobando así la lectura en una “red” de defectos:

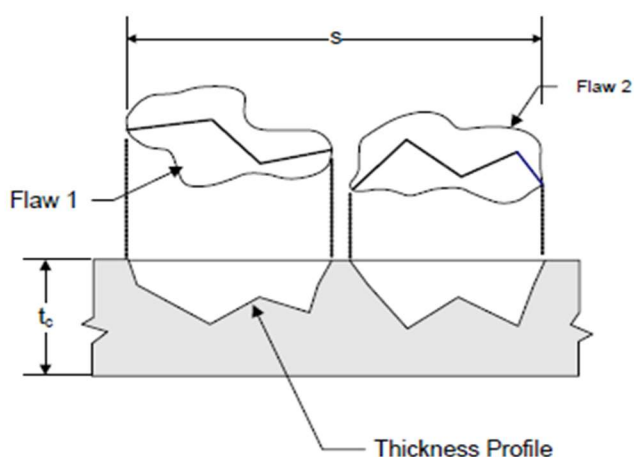


Figura 15. Red de defectos por corrosión.

Fuente: Técnica de lecturas de espesor, ASME FFS-1/API 579

2.3.3. LOSS

Se utiliza para cuantificar la pérdida de material existente respecto al espesor nominal de diseño.

$$LOSS = t_{nom} - t_{mm}$$

Ecuación 6.

Donde :

- t_n : Espesor nominal (Nominal Thickness) según fabricante.
- t_{mm} : Espesor mínimo medido (minimum Measured Thickness) de la superficie sin daño que presenta una superficie uniforme alrededor del defecto.

2.3.4. FCA

Es la corrosión admitida a futuro (*Future Corrosion Allowance*). Permite añadir mayor restricción al cálculo de espesor mínimo requerido de operación en el cálculo de estanque puede ser solicitado por el ingeniero a cargo de inspecciones y mantenimiento, basado en tasas de corrosión según trazabilidad del equipo, de equipos similares si se está trabajando en uno nuevo, o en la información dada por el propio fabricante.

2.3.5. Altura máxima de llenado (MFH)

Es el criterio de aceptabilidad de la norma API 587 para sus evaluaciones en tanques atmosféricos, corresponde a la *Altura Máxima de Llenado* (MFH). Se expresa en metros y está basada en la norma API 653 y 650, que consiste en despejar la altura requerida según el anillo correspondiente en función de su espesor:

$$MFH = \frac{S * E * t_{min}}{4.9G}$$

Ecuación 7.

Donde,

MFH : Altura de llenado máximo, expresado en metros (m)

E : Eficiencia (confiabilidad) de unión del manto, se utilizará con valor igual a 1.

S : Esfuerzo admisible. Se utiliza el valor del esfuerzo de diseño (S_d) según Api 650, tabla 5.2a de la norma citada.

Para el caso de recipientes presurizados y cañerías el MFH pasa a ser *Presión Máxima Admitida* (MAWP) y se expresa en megapascuales [MPa].

2.3. IMPLEMENTACIÓN DE EVALUACIÓN FFS AL ESTANQUE CLARIFICADOR

Como se ha documentado anteriormente, la metodología de las evaluaciones FFS que provee la norma, se basa en la teoría de esfuerzo máximo y el estudio de resistencia de materiales en sus límites de plasticidad.

La evaluación de integridad estructural al estanque clarificador se ajusta a las siguientes condiciones en conformidad con la norma API 579/ AMSE FFS-1:

- Corresponde a un tanque atmosférico diseñado por API 650.
- El equipo y sus anillos cilíndricos presentan una ductilidad adecuada (materiales listados y aceptados por API). En caso de no conocerse esta información, se debería realizar una evaluación FFS para fractura frágil (evaluación FFS [parte 3](#)) que pudieran llevar a una deformación estructural.

Ya establecidos en las anteriores secciones los procedimientos de la evaluación de integridad mecánica, se continuará con la implementación de la normativa sobre el tanque clarificador N°2 según el siguiente diagrama de la figura 16 (API 579-1/ASME FFS-1, 2021):

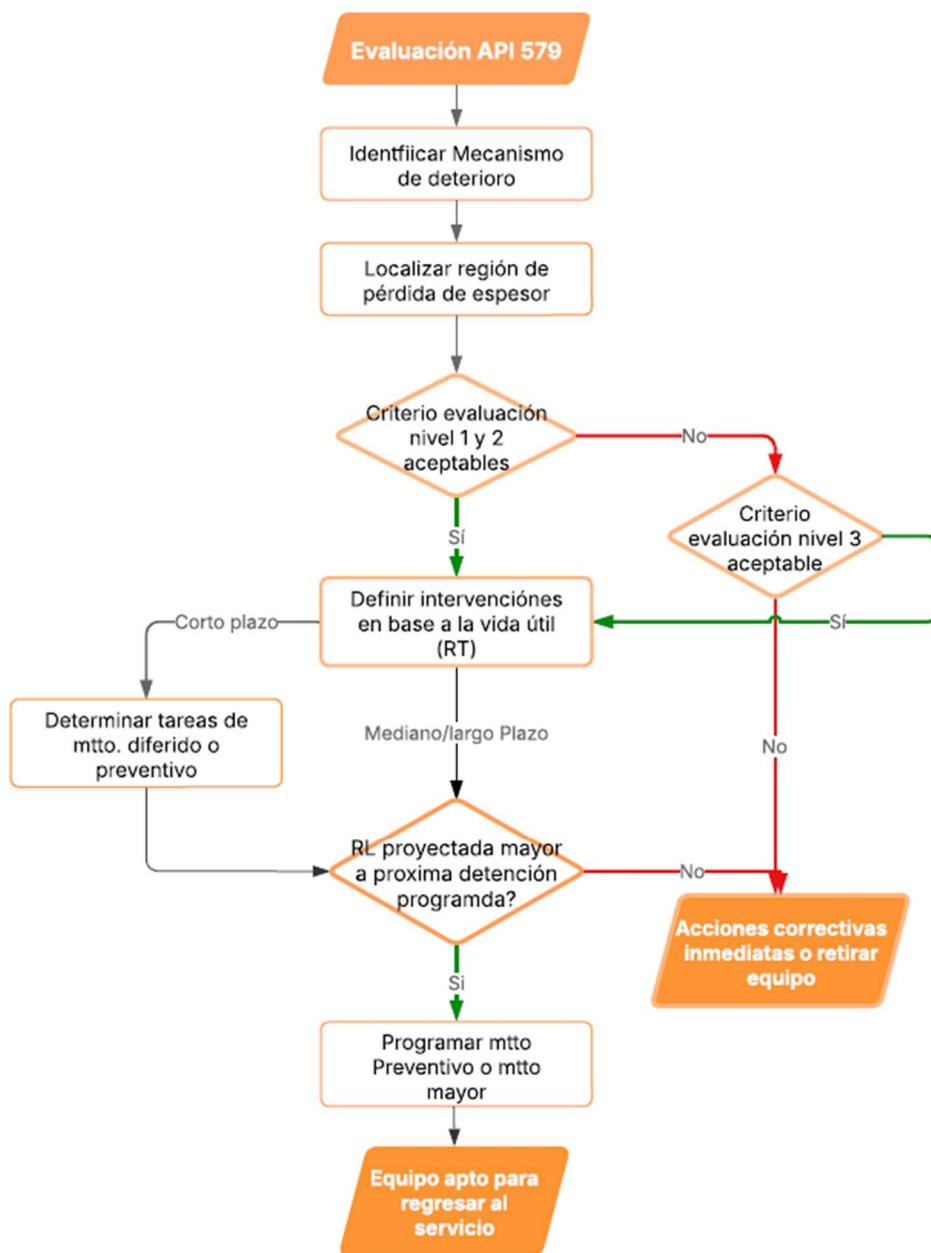


Figura 16. Procedimiento general de evaluación para cada sección o parte
Fuente: FFS Assessment Procedures (API579/FFS-1, página 2-15)

En síntesis, la metodología indica qué:

- Debe ser identificado el mecanismo de deterioro o defecto (flaw).
- Aplicabilidad de la sección o parte de evaluación correspondiente al mecanismo de deterioro/flaw.
- Reunir la información correspondiente a los datos de diseño del equipo estático (pipping, recipiente presurizado o tanque según corresponda), historial, antecedentes y toda información operacional disponible sobre el activo.
- Proceder con los criterios (niveles) cuantitativos correspondientes indicados para dicha parte o sección (establecer los espesores y realizar los cálculos indicados)
- Obtener indicadores clave (vida útil remanente y tasa de corrosión)

- Definir acciones de remediación: mtto. correctivo, preventivo o retirar del servicio el activo basado en los resultados consolidados.

De acuerdo con la norma y a los hallazgos de inspección, la problemática actual puede ser estudiada en el marco de la sección o *parte 4* (Pérdida de metal generalizada) o de la *parte 5* (Pérdida de metal localizada).

La selección de un procedimiento específico depende de los datos reunidos para el equipo y lecturas de espesor disponibles.

Tabla 5. Datos Estanque Clarificador N°2
Fuente: Elaborado a partir de informe de inspección de planta celulosa.

Información del estanque		
Material	Acero ASTM	A285 Gr C
Tipo de techo	Fijo	Auto soportado
Cantidad de Anillos	7	
Componente	4to	anillo
Última Inspección	2023	(año)
Fabricación	1995	(año)
Altura máx. llenado	11.84	[m]
FCA	1.0	[mm]
Diámetro	26.04	[m]
t _{nom}	14.5	[mm]

NOTA: El criterio de cálculo de espesor mínimo requerido, se ajusta a la norma API 650 para tanques atmosféricos tanto para el manto completo como para cada anillo que deba ser evaluado.

Tabla 6. Información sobre fluido contenido y esfuerzos.
Fuente: Elaboración propia e informe de inspección.

Datos sobre el fluido		
P _{licor verde}	1000	[kg/m3]
H _{fluido}	11,84	[m]
G _{específica}	1	



Figura 17. Esquema de anillos de tanque clarificador N°2.

Fuente: Informe de inspección TAG 253-022-200

Los esfuerzos admisibles se abordaron desde a la norma API 650, tabla 2.A del estándar, para materiales que poseen mayor tenacidad en condiciones más exigentes de temperatura. El material del equipo corresponde a un acero dúctil, específicamente a un ASTM A285 Gado “C” como se indica en la tabla 7.

Tabla 7. Esfuerzos admisibles según materiales listados

Fuente: Tabla 2.A, norma API 650

Plate Specification	Grade	Nominal Plate Thickness <i>t</i> mm	Minimum Yield Strength MPa	Minimum Tensile Strength MPa	Product Design Stress <i>S_d</i> MPa	Hydrostatic Test Stress <i>S_t</i> MPa
ASTM Specifications						
A283M	C		205	380	137	154
A285M	C		205	380	137	154
A131M	A, B		235	400	157	171
A36M	—		250	400	160	171
A131M	EH 36		360	490 ^a	196	210
A573M	400		220	400	147	165
A573M	450		240	450	160	180
A573M	485		290	485 ^a	193	208

Estos esfuerzos admisibles por norma han sido ordenados en la siguiente tabla:

Tabla 8. Esfuerzos admisibles en el equipo según norma
 Fuente: Tabla 2.A., Api 650

Esfuerzos admisibles según material		
σ_y (yield)	205	[MPa]
σ_r (tensil)	380	[MPa]
S_d	136.67	[MPa]
S_t	153.75	[MPa]

Finalmente, es posible identificar el mecanismo de daño como corrosión externa (CUI) e interna, corrosión química provocada por la exposición continua al licor verde (Capitulo 1). Se implementará la evaluación por perdida de metal localizada que corresponde al **FFS assessment part 4**, implementando un nivel 1 y 2 de análisis, considerando la información reunida en inspecciones, fotografías y lecturas de espesor del equipo.

2.3.1. Registro y técnica de lectura para la evaluación

Se comenzará implementando la técnica de *puntos de lectura de espesor* (PTR). Ello requiere antes que todo, obtener registros de lectura de mínimo 15 puntos, y de máximo indeterminado. Ello permitirá determinar el coeficiente de variabilidad (COV).

Tabla 9. Formato de llenado para PTR
 Fuente: API 579/AMSE FFS1.

Location	Thickness Reading $t_{rd,i}, i = 1 \text{ to } N$	$(t_{rd,i} - t_{am})$	$(t_{rd,i} - t_{am})^2$
1			
2			
3			
...			
...			
...			
...			
...			
15			
...			
...			
...			
...			
N			
—	$t_{am} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{rd,i} =$		$S = \sum_{i=1}^N (t_{rd,i} - t_{am})^2 =$

2.3.2. Evaluación: Nivel 1 y 2

Se implementará el procedimiento de evaluación Api 579/FFS-1 de Nivel 1 y 2, el cual permite utilizar la técnica PTR escogida, para evaluar un componente tipo A con pérdida de metal generalizada (parte 4).

2.3.2.1. Paso 1: Determinar espesor mínimo

El primer paso es obtener el espesor mínimo de diseño para el 4to anillo en evaluación, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$t_{min} = \frac{4.9D(H-3)G}{S_d} + FCA \quad \text{Ecuación 8.}$$

Considerando la distancia entre anillos como se muestra en la figura 9, se obtiene:

$$t_{min} = 5.61 [mm] \quad \text{Ecuación 9.}$$

2.3.2.2. Paso 2: Parámetros principales de la evaluación

Se determinará el espesor mínimo medido (t_{mm}), el *espesor promedio medido* (t_{am}) y el factor de *desviación de la muestra* (S) de las lecturas registradas durante la inspección que se muestran en la tabla 10:

Tabla 10. PTR (puntos de lectura de espesor) del Anillo N°4.
Fuente: Elaborado en base a API 579/AMSE FFS1

Eje Nivel						
	0°	90°	180°	270°	315°	
1	6,6	6,8	10,7	6,5	6,6	
2	6,3	6,4	10,7	6,5	6,3	
3	6,2	6,2	10,5	6,5	6,5	
4	5,5	5,7	11,3	6,0	5,6	
5	5,7	5,5	11,7	5,8	5,9	
6	5,6	5,8	11,2	5,5	5,6	
7	5,8	6,2	11,2	5,9	6,0	
8	6,2	6,5	10,8	6,0	6,2	
9	6,5	6,6	10,6	6,5	6,3	
10	6,4	9,4	11,1	9,7	9,6	
11	9,6	10,3	11,8	9,9	10,1	
12	11,6	11,5	12,1	11,4	11,9	
13	12,5	12,8	12,2	12	11,5	
14	12,9	13	13,2	11,8	12,6	
15	13,3	13,4	13	12,1	13,2	

Leyenda ($t_{\text{nominal}} = 13.5_{\text{[mm]}}$)		
	t_{medido} cercano al $t_{\text{nominal}} = 13.5_{\text{[mm]}}$	
	$t_{\text{medido}} < \text{al } 60\% t_{\text{nominal}}$	
	$t_{\text{medido}} < t_{\text{nominal}}$	

Para ello se agruparán los PTR o lecturas de espesor de los 4 ejes longitudinales con mayor nivel de corrosión dando un total de 36 lecturas:

Tabla 11. PTR agrupadas en 5 ejes meridionales.
 Fuente: Elaborado en base a API 579/AMSE FFS1

Niveles	0°	90°	180°	270°	315°
1	6,6	6,8	10,7	6,5	6,6
2	6,3	6,4	10,7	6,5	6,3
3	6,2	6,2	10,5	6,5	6,5
4	5,5	5,7	11,3	6,0	5,6
5	5,7	5,5	11,7	5,8	5,9
6	5,6	5,8	11,2	5,5	5,6
7	5,8	6,2	11,2	5,9	6,0
8	6,2	6,5	10,8	6,0	6,2
9	6,5	6,6	10,6	6,5	6,3
10	6,4	9,4	11,1	9,7	9,6
11	9,6	10,3	11,8	9,9	10,1
12	11,6	11,5	12,1	11,4	11,9
13	12,5	12,8	12,2	12,0	11,5
14	12,9	13,0	13,2	11,8	12,6
15	13,3	13,4	13,0	12,1	13,2

Para obtener el t_{am} se aplicará la siguiente sumatoria:

$$t_{am} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{rd,i}$$

Ecuación 10.

$$t_{am} = 6.11 \text{ [mm]}$$

Se prosigue a calcular el factor de desviación de la muestra (S):

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

Ecuación 11.

$$S = 4.98$$

Finalmente es posible conocer el coeficiente de variación de espesor (COV), donde:

$$COV = \frac{1}{t_{am}} \left[\left(\frac{S}{N-1} \right) \right]^{0.5}$$

Ecuación 12.

$$COV = 0.0617$$

2.3.2.3. Paso 3: Análisis de puntos de lectura PTR

Dada la variabilidad que presentan algunas zonas de adelgazamiento por corrosión, se ha obtenido un COV cercano al 10%, lo cual es aceptable cerca del límite:

$$COV = 0.062$$

$$\therefore COV < 0.1 ; \text{Aceptable}$$

2.3.2.4. Paso 4: Criterio de aceptación

El COV registrado es inferior a 1, de acuerdo con API 579/AMSE FFS1 es aceptable continuar con el método de PTR para este paso. El criterio de aceptación del assessment parte 4, nivel 1 y 2, para tanques atmosféricos indica:

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

$$t_{am} - FCA \geq t_{min} \tag{Ecuación 13.}$$

$$(6.11 - 0.3 = 5.8) \geq (t_{min} = 5.61) \rightarrow \text{Se cumple}$$

- En caso de no cumplirse esta relación, es posible basarse en la altura máxima de llenado (MFH) como siguiente criterio de aceptación.

Tabla 12. Criterio de aceptación para Niveles 1 y 2 (evaluación parte 4).

Fuente: API 579/AMSE FFS1, assessment part 4.

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

El criterio de aceptación para evaluación de nivel 1-2 basados en MFH indica que:

- Se establecerá una *altura máxima de llenado restringida* (MFH_r), basando este cálculo en el espesor promedio medido(*t_{am}*) y la corrosión futura admisible (FCA):

$$MFH_r = \frac{(t_{am} - FCA) S}{4.9DG} + 0.3$$

Ecuación 14.

Tabla 13. Criterio de aceptación para Niveles 1 y 2 (parte 2).
Fuente: API 579/AMSE FFS1, assessment part 4.

Assessment Parameter	Level 1 Assessment Acceptance Criteria	Level 2 Assessment Acceptance Criteria
<i>MAWP</i> or <i>MFH</i> from Point Thickness Readings (<i>PTR</i>)	- Cylindrical and Conical Shells, and Elbows Compute the <i>MAWP_r</i> based on the thickness $(t_{am} - FCA)$ Acceptability criteria $MAWP_r \geq MAWP$ - Spherical Shells and Formed Heads Compute the <i>MAWP_r</i> based on the thickness $(t_{am} - FCA)$ Acceptability criteria $MAWP_r \geq MAWP$ - Atmospheric And Low Pressure Storage Tanks Compute <i>MFH_r</i> based on the thickness $(t_{am} - FCA)$ Acceptability criteria $MFH_r \geq MFH$	- Cylindrical and Conical Shells, and Elbows Compute the <i>MAWP_r^C</i> based on the thickness $(t_{am} - FCA)/RSF_a$ Compute the <i>MAWP_r^L</i> 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 <i>MAWP_r</i> based on the thickness $(t_{am} - FCA)/RSF_a$ Acceptability criteria $MAWP_r \geq MAWP$ - Atmospheric And Low Pressure Storage Tanks Compute the <i>MFH_r</i> based on the thickness $(t_{am} - FCA)$ Acceptability criteria $MFH_r \geq MFH$

Con ello se procede a obtener el siguiente criterio de aceptabilidad según la tabla 13, para $(MFH_r) \geq (MFH)$ y una vez reunida la siguiente información:

Tabla 14. Datos y criterio de aceptabilidad.
Fuente: Elaborado a partir de assessment part 4 de la norma y PTR

Espesores y Altura de Anillo			Datos Estructurales			Criterio		
h _{anillo 4}	5,99	[m]	D	26,04	[m]	MFHr >= MFH		
Tmin	5,61	[mm]	Sd	136,66	[MPa]	MFH	6,01	m
tam-FCA	5,81	[mm]	E	1	-	MFHr	6,53	m
			G _s	1	-			

De este modo:

$$(MFH_r = 6.53\text{ m}) \geq (MFH = 5.86\text{ m}) \qquad \rightarrow \textit{Se cumple}$$

La altura máxima de llenado restringida para el manto actual (MFH_r) es superior a la altura máxima de llenado por norma (MFH) para este estanque. Significa que el activo puede operar en las condiciones actuales.

Ya con el criterio para nivel 1 y 2 de evaluación admitido, la norma indica que se debe continuar con un análisis de vida remanente basado en la tasa de corrosión. Esto busca finalmente determinar un intervalo de tiempo para implementar medidas de mitigación y acciones de mantenimiento preventivo.

2.3.3. Vida útil remanente (RL)

La vida remanente corresponde al tiempo residual (RL) del activo para cumplir su función operativa sin riesgos al personal y sin producirse un modo de falla. Esta RL será abordada basándose en la tasa de corrosión (CR):

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

Ecuación 15.

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

Ecuación 16.

Donde,

- ΔT : Variación del tiempo entre lecturas/registros de espesor. Según sea a largo (LT) o corto plazo (ST).

En la obtención de la tasa de corrosión, es posible aplicar un análisis estadístico a corto (ST) o largo plazo (LT) según se disponga de lecturas de inspección y la trazabilidad existente del tanque.

Tabla 15. Obtención de CR para el estanque
Fuente: Elaborado a partir de API 579, sección 4.5.1.1.

Periodo (Años)	Registro (mm)	ST (mm/año)	LT (mm/año)	CR (mm/año)
1995	14,0	-	0,282	0,282
2003	-			
2010	-			
2016	-			
2024	6,1			

Debido a que no se cuenta con registros de lecturas e inspecciones de los años previos a la última inspección realizada en junio de 2024, se procede a la opción de tasa de corrosión a largo plazo (LT), tal como se indica en la tabla 16.

De este modo la tasa de corrosión corresponde a 0.263 (mm/año) considerando como la zona más crítica de la estructura (Anillo N° 4 del manto), la lectura de menor espesor registrado.

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

Ecuación 17.

Donde:

- R_L : Vida remanente. Por sus siglas en inglés, “*Remaining Life*”.
- K : Factor de corrección según nivel de evaluación. Para anillos de tanques atmosféricos, su valor corresponde a 1. (según API 579).
- t_{min} : Espesor de pared mínimo según norma.
- C_{rate} : Tasa de corrosión, proyectada en mm/año.

La vida remanente (RL) fue determinada según API 579/ASME FFS1 (Ecuación 17) en base al espesor mínimo por norma (t_{min}), el espesor promedio (t_{am}), y corrosión rate (CR) como se indica a continuación:

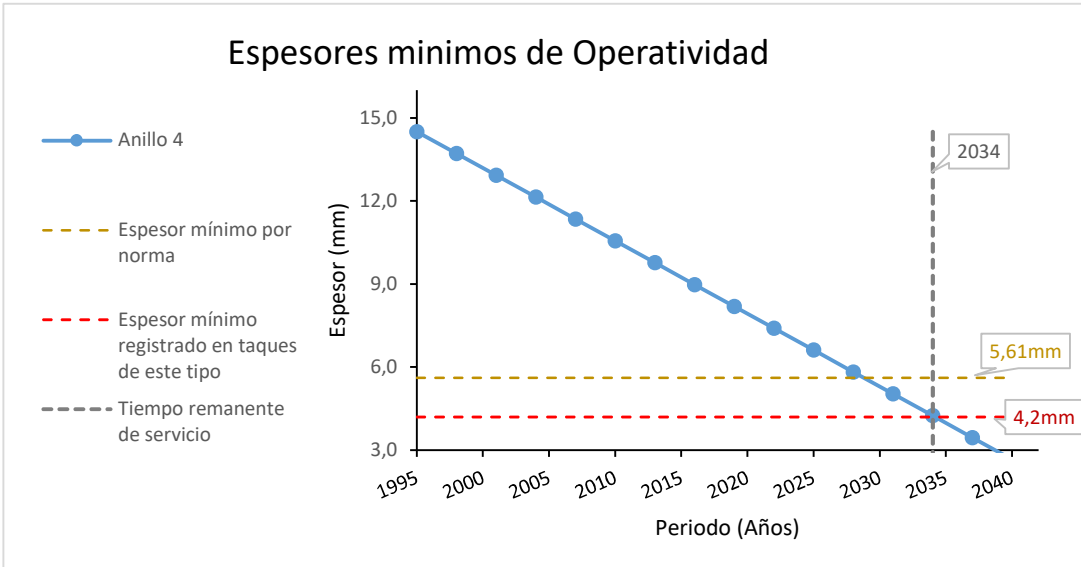
Tabla 16. Datos agrupados de Vida remanente (RL).
Fuente: Elaborado a partir de API 579, sección 4.5.1.1.

Periodo (año)	Tasa de corrosión (mm/año)	Zona crítica Anillo 4 (mm)	Espesor mínimo por diseño (mm)	RL (años)
1995	0,282	14,50	5,61	2,05
1998		13,71		
2001		12,92		
2004		12,13		
2007		11,34		
2010		10,56		
2013		9,77		
2016		8,98		
2019		8,19		
2022		7,40		
2025		6,61		
2028		5,82		
2031		5,03		

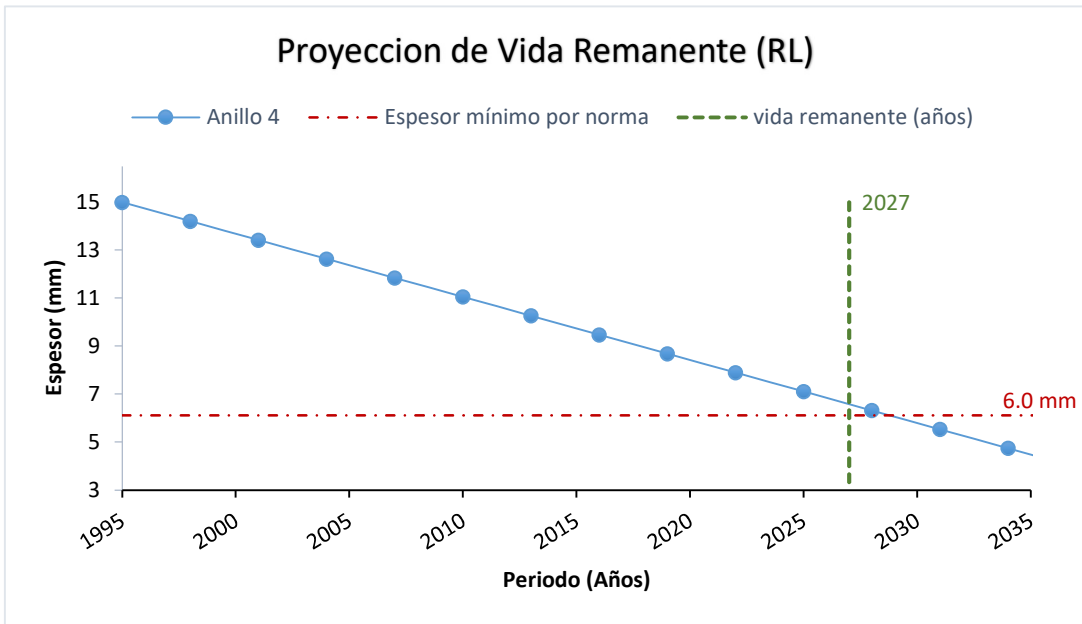
De acuerdo con las gráficas 1 y 2, modeladas para *condiciones de operatividad* en determinados espesores admisibles y proyección de *vida remanente (RL)*:

- El espesor disminuirá por debajo de los 5.61 mm permitidos por diseño y norma hacia el año 2028. Se observa una vida remanente de 2 años como máximo, cumpliéndose este plazo en el año 2027.
- Después de 2029, el límite de seguridad admisible por norma en el anillo 4 ya habrá sido rebasado.

Gráfica 1. Condiciones de Operatividad.
Fuente: Elaborado desde assessment part 4, RL y CR



Gráfica 2. Vida remanente (RL) modelada.
Fuente: Elaborado a partir del assessment part 4 de la norma, RL y CR



- El registro mínimo de espesor por corrosión localizada en anillos de tanques en operación dentro de la planta ha sido 4.1 [mm] de espesor, plazo que se cumpliría

en el año 2034. Sin embargo, esto es 1.9 [mm] por debajo la norma, lo cual conlleva serios riesgos estructurales (deformaciones, filtraciones, colapsos), riesgos para el personal (derrumbe, derrames y exposición a químicos corrosivos para el ser humano) y medio ambientales.

- Se requerirá acciones de mantenimiento preventivo o medidas de mitigación de fugas antes del plazo de marzo de 2027, de modo que se asegure la continuidad operativa del estanque, sin afectar la seguridad del personal y no interrumpir excesivamente la producción de la línea de caustificación de la planta.

2.3.4. Observaciones Finales y escenarios de intervención

La implementación de la norma Api 579/FFS1 en el tanque clarificador permitió identificar el mecanismo de deterioro y medir aspectos claves respecto a la vida remanente del activo.

El mecanismo de deterioro fue identificado como una combinación de corrosión externa e interna. Externamente, el daño corresponde a corrosión bajo aislamiento (CUI, corrosion under insulation) asociada al almacenamiento prolongado.

Internamente, se detectó corrosión química provocada por la exposición continua al licor verde, subproducto del proceso de celulosa, el cual genera un ambiente altamente alcalino y con compuestos sulfurosos que aceleran el deterioro del acero ASTM A285 Gr. C. Ambos mecanismos actúan de manera conjunta, comprometiendo la integridad estructural del anillo N° 4 del tanque, por lo que se establecen dos escenarios de intervención:

1. Reparaciones provisorias:

Esta opción prioriza la continuidad operativa y el control de riesgo a corto plazo. Mientras se gestiona el programa de mantenimiento mayor, se implementará un procedimiento de reparación temporal mediante parches sobrepuestos sobre las zonas afectadas.

2. Mantenimiento mayor (Overhaul):

Consiste en el reemplazo completo del anillo afectado. La ejecución requerirá apoyo de grúa para la manipulación y sujeción del cuerpo del tanque durante las maniobras de corte y reposición.

Esta alternativa permite restablecer la integridad estructural del equipo conforme a los lineamientos del código API 650 y los criterios de calificación de procedimientos de soldadura (ASME Sección IX).

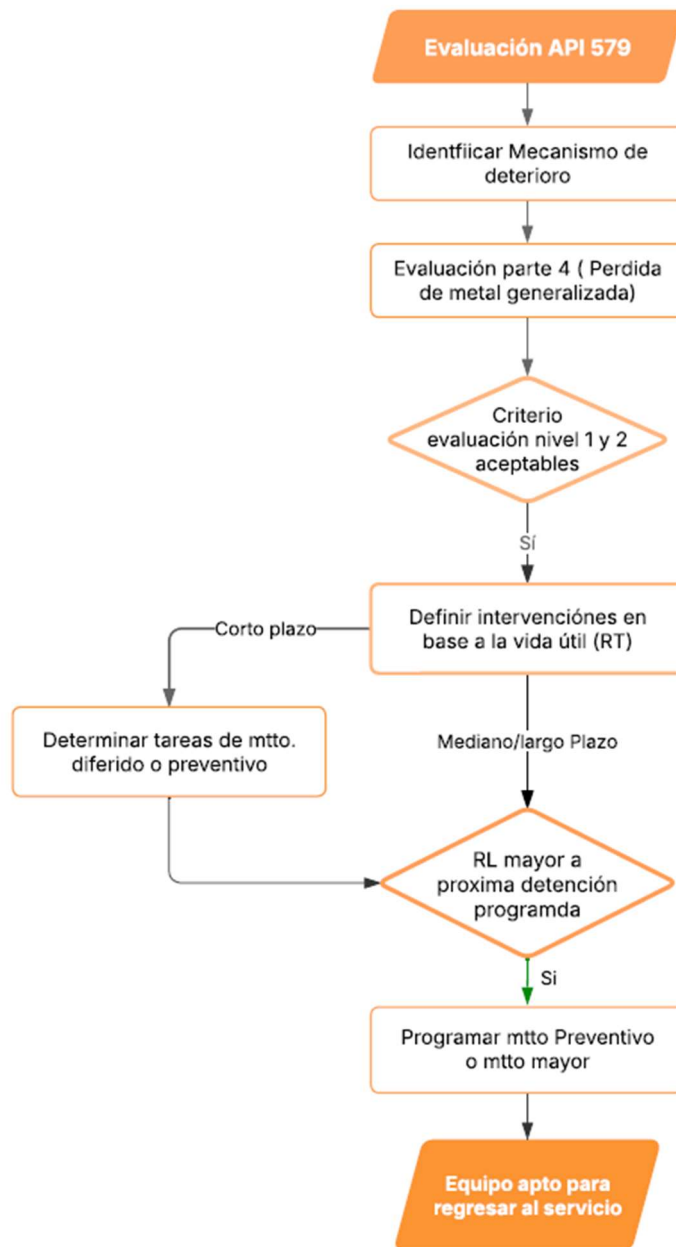


Figura 18. Procedimientos y escenarios de intervención
Fuente: A partir de assessment part 4 (API579/FFS-1, figura 4-1)

**CAPÍTULO 3: DESARROLLO DE PROPUESTA TÉCNICA Y APROXIMACIÓN DE
COSTOS**

3. PROPUESTA TÉCNICA Y APROXIMACIÓN DE COSTOS

En este capítulo, se desarrollará la propuesta técnica de mantenimiento sobre estanque clarificador N°2 de la línea de caustificación. Se consolidarán los datos desarrollados a través del capítulo 2 y desglosarán los costos asociados a la implementación de propuestas de mantenimiento.

Las propuestas en este capítulo están basadas en los resultados cuantitativos de confiabilidad que otorga la evaluación ASME FFS-1/API 579 y los datos existentes en la empresa sobre producción, costos directos, y riesgos asociados a no intervenir oportunamente sobre el activo.

3.1. PROPUESTA TÉCNICA

La operación del activo al 100 % de su altura máxima de llenado (MFH) se proyecta con seguridad por un período de 1,5 a 2 años. Superar dicho intervalo podría generar fugas, derrames de licor verde o pérdida de estabilidad estructural, con impacto directo en la producción y en la seguridad del personal.

Desde la perspectiva del mantenimiento, se definen 2 propuestas:

1. Medidas de mitigación por condición: Busca preservar la vida útil del activo mediante una intervención conservadora, instalando parches sobrepuestos dimensionados según el área más crítica afectada (filtración detectada) del anillo 4, ello requerirá inspecciones periódicas frecuentes.

Esta opción prioriza la continuidad operativa y el control de riesgo a corto plazo. Los parches emplearán soldaduras tipo filete con cordón de 14 mm, ejecutadas con proceso SMAW y electrodo E7018. El costo de intervención se expresará en función de los metros lineales (ML) de soldadura requeridos, tomando como referencia un parche estándar de 1 m² para efectos de estimación económica.

2. Mantenimiento preventivo por sustitución: Contempla el reemplazo integral del anillo N° 4 con su correspondiente monitoreo periódico durante el ciclo de servicio establecido. Se realizaría empleando proceso de soldadura MIG (GMAW) con unión tipo doble V y material de aporte ER70S-6, equivalente metálico al electrodo E7018, de bajo contenido de hidrógeno y adecuada tenacidad para aceros de baja resistencia como el ASTM A285 Gr. C.

Si bien requiere una mayor inversión inicial, asegura una solución estructural de largo plazo, reduciendo futuras intervenciones y minimizando el impacto en la producción.

3.2. COSTOS

El estudio de los costos asociados a cada propuesta se estimará considerando un plazo de 1.5 a 2 años como se mencionó en la sección anterior.

A continuación, se desglosarán los costos de la propuesta 1 ([sección 3.2.1](#)). y 2 ([sección 3.2.2](#)).

3.2.1. Propuesta 1: Instalación de parche en la región afectada

Esta propuesta considera ejecutar trabajos de mantenimiento preventivo solo en la región afectada con adelgazamiento por corrosión mediante parches sobrepuestos que impidan posibles filtraciones o fugas.

De 75 mediciones o lecturas, 13 de estas presentan defectos por corrosión en su superficie indicando espesores inferiores a 6[mm], lo que representa el 18 % (aprox.) de la superficie total del anillo 4. De modo que:

- Diámetro del Anillo 4 = 26 [m]
- Altura del Anillo 4 = 1,95 [m]

$$A_{total} = \pi * diámetro * h \quad \text{Ecuación 18.}$$

$$A_{total} = 159.19 \, m^2 \quad \text{Ecuación 18.a.}$$

- Zona critica a considerar = 20 % del área total

$$A_{t \, critico} = \pi * 26(4/5) * 1.9 (4/15) [m^2] \quad \text{Ecuación 18. b.}$$

La ecuación anterior considera que son 4 de 5 los ejes meridionales afectados (ancho), y 4 de 15 los ejes verticales (altura) afectados con lecturas de espesor inferiores a 6 [mm].

La zona total con espesores (t) críticos ($t > 6$ [mm]) corresponde a 33.98 [m²].

Para este caso se estimó preparar 3 planchas de 1x1 [m²] en caso de que se detecten filtraciones, muy posiblemente, en alguna región del 20% más crítico de la superficie del anillo.

Tabla 17. Dimensiones para el 18% crítico
 Fuente: Elaborado a partir de informe inspección Tanque N°2, planta celulosa.

Propuesta 1: Parches sobrepuestos (20% aprox. del área total)			
h _{parche}	1 [m]	perímetro _{de la base}	1 [m]
Ancho	1 [m]	Longitud _{total de soldadura}	4 [m]
A _{reparar}	33,98 [m ²]	A _{parche}	1 [m ²]

La *longitud total de soldadura* considera cada junta de los parches sobrepuestos y de dimensión 1x1 [m] sobre la zona que presente la fuga.

3.2.1.1. Costos de materiales y consumibles

El material corresponde al acero ASTM A285 Gr C, cuyo precio por [Kg] puede variar según el proveedor y las condiciones del mercado. Se ha establecido su valor en 1,00 [USD] por [kg] considerando fuentes como “Slostock Chile” y “CYP ingenieros S.A.”, cuyos valores fluctúan entre 0.5 y 1.5 [USD].

Se ha considerado solicitar 3 parches en el presupuesto. Pero se ha planteado soldar solo 1 de ellos (2 de repuesto en caso de otras filtraciones).

Tabla 18. Resumen Costos de Materiales (Propuesta 1)
 Fuente: Cotizaciones y proveedores de la planta de celulosa.

Materiales y consumibles	Cantidad	Costo/Cantidad (USD)	Costo final (USD)	Costo final (CLP)
Parche Acero ASTM A285 Gr C	3,0 [m²]	108,80 [USD/m²]	\$326,40	\$310.083
Electrodos (soldadura)	4,5 [kg]	8,00 [USD/kg]	\$41,54	\$39.465
			\$367,95	\$349.548

Fue incluido en el presupuesto de electrodos un 10% por concepto de margen extra ante imprevistos.

En el [Anexo 2](#) (tabla 36) se detallan los cálculos y el método utilizados para la obtención de soldadura

3.2.1.2. Mano de obra

Las horas/día indicadas en la tabla siguiente, se basan en un avance de 1.7 [m/h] de soldadura ejecutada (equivalentes a 1.5 Kg/h), con una productividad del 70%~80%

establecida para cada soldador. Dando un total de 4.1 [h] de trabajo. El costo final considera un bono de producción de 10% por cumplimiento de productividad.

Tabla 19. Tiempo total en completar obra
Fuente: Estimaciones industria e información de la planta celulosa.

Obra	Tiempo en soldar (hr)	Productividad 80%	Soldadores (3)	Jornada total(días)	Total + ayudante (días)
1,5 [Kg/hr]	3,4 [h]	4,1 [h]	2 [h]	0,26	0,21

Si se considera que el ayudante aporta un 20% a la productividad, las obras deberían extenderse no más de 4 [h] según muestra la tabla 21.

Finalmente, el presupuesto considera pago del día completo (en horas) por concepto de tareas de contingencia:

Tabla 20. Costos de HH (Propuesta 1)
Fuente: Estimaciones industria e información de la planta celulosa.

Mano de Obra	Cantidad	H/día	valor hh (CLP)	Costo final (USD)	Costo final (CLP)
Ayudante	1	12	\$6.050	\$76,42	\$72.600
Soldador	2	12	\$8.250	\$208,42	\$198.000
Supervisor	1	12	\$19.800	\$250,11	\$237.600
				\$534,95	\$508.200

3.2.1.3. Inspección y NDT

La inspección se realizará en media jornada (4 [h]).

Tabla 21. Costos Inspección y NDT (Propuesta 1)
Fuente: Cotizaciones y proveedores de la planta de celulosa.

Tipo de inspección y NDT	Costo estimado (USD)	Costo estimado (CLP)
Ensayo de UT en soldaduras	\$ 1,700.0	\$ 1.615.000
	\$ 1.700,00	\$ 1.615.000

3.2.1.4. Costos por producción

La empresa posee andamios para trabajar en obras de altura, se requerirá arrendar grúa ligera considerando que cada parche pesa sobre 100 [kg].

Tabla 22. Costos Producción (Propuesta 1)
Fuente: Cotizaciones y proveedores de la planta de celulosa.

Concepto	Cantidades	Costo (USD/día)	Total (USD)	Total (CLP)
Arriendo de equipos de soldadura	3 unidades	\$80,00	\$960,0	\$912.000
Izaje (grúa / pluma ligera + operador)	1 día	\$1.650	\$1.650,0	\$1.567.500
Montaje andamio	Medio día	-	-	-
EPP (equipos seguridad)	4 personas	\$100,00	\$400,0	\$380.000
Detención no-programada	5 [h]	\$33.819,35	\$169.096,7	\$160.641.909
			\$172.106,75	\$163.501.409

Estos trabajos correctivos diferidos han sido coordinados a las detenciones programadas en el corto plazo, sin embargo, ante detención no programada, se realizará con el equipo funcionando al 55 % de capacidad (MFH = 6 [m]) durante 6 [h].

3.2.2. Propuesta 2: Reemplazo del anillo completo

Esta propuesta considera la instalación de un nuevo anillo utilizando un parche calzado compuesto de 14 planchas, y abarcará un área total de 159.19 [m²] como se muestra en la ecuación 17.a.

Se procederá con la estimación de costos en base a las siguientes dimensiones para el anillo N°4:

Tabla 23. Dimensiones para cálculo de propuesta 2
Fuente: Elaborado a partir de informe inspección tanque N°2, planta celulosa.

Propuesta 2: Reemplazo 100% del área total			
h parche	1,95 [m]	Perímetro de la base	81,6 [m]
Diámetro zona afectada	26,0 [m]	Planchas requeridas	14 [Un]
Área reparar	159,19 [m²]	Longitud total de soldadura	192,53 [m]

Se utilizarán 14 planchas de 2x6 [m] para abarcar la longitud perimetral de 81 [m].

3.2.2.1. Costo materiales y consumibles

El precio por [Kg] del acero ASTM A285 Gr C será considerado con el mismo valor obtenido anteriormente, 1,00 [USD] por [kg] considerando que en cantidades sobre 50 m² el mismo proveedor ofrece 25% de descuento.

El proceso de soldadura para esta propuesta N°2 será GMAW (MIG), con hilo ER70S-6 ya que los datos en la industria y en el *Manual del soldador* (Orekilon, 2001) indican una eficiencia entre 92%~98%. El alambre (hilo) a utilizar bordea los 9 UDS en el mercado según proveedores como “Global Industrial”.

Tabla 24. Resumen Costos de Materiales (Propuesta 2)
Fuente: Cotizaciones y proveedores de la planta de celulosa.

Materiales y consumibles	Cantidad	Costo/ Cantidad (USD)	Costo final (USD)	Costo final (CLP)
Parche Acero ASTM A285 Gr	159,19 [m²]	75,00 [USD/m²]	\$ \$11.939,85	\$11.342.857
Hilo MIG ER70S-6 (soldadura)	226 [kg]	9 [USD/kg]	\$2.356,59	\$2.238.759
Gas (argon/CO2)	71 [m³]	2 [USD/m³]	\$142,00	\$134.900
			\$14.438,44	\$13.716.517

Fue incluido en el presupuesto de electrodos un 10% por concepto de margen extra ante imprevistos.

En el [Anexo 3](#) (tabla 37), se detallan los cálculos y el método utilizados para la obtención de soldadura.

3.2.2.2. Mano de obra (HH)

Se plantea que dos soldadores operen simultáneamente en cada extremo del anillo y se estima que, por 1 hora, el especialista lograría soldar 2 [kg] del total de 238 [kg].

Tabla 25. Tiempo total en completar obra.
Fuente: Estimaciones industria e información de la planta celulosa.

Obra	Tiempo en soldar (hr)	Productividad 80%	Soldadores (3)	Jornada total(días)	Total + ayudante (días)
1,8 [Kg/hr]	132,6 [h]	176,8 [h]	88 [h]	11,05	8,84

Las 177 [h] indicadas en la tabla 25, se traducen en 8~11 días de trabajo (8h) y considerando una productividad del 75%. Estos plazos se ajustan a la parada de planta programada para el mes de enero (20 días semanales más 2 sábados) a modo de no incurrir en costos excesivos por no-producción.

Tabla 26. Costos de HH (Propuesta 2)
Fuente: Cotizaciones y proveedores de la planta de celulosa.

Especialización	Cantidad	HH	Valor hh (CLP)	Costo final (USD) ^{+10%}	Costo final (CLP) ^{+10%}
Ayudante	1	177 [h]	\$3.781	\$703,58	\$668.401
Soldador	2	177 [h]	\$5.156	\$1.918,86	\$1.822.913
Supervisor	1	90[h]	\$12.375	\$1.172,37	\$1.113.750
				\$3.794,80	\$3.605.064

El costo final considera un bono de producción de 10% por cumplimiento de productividad.

Por su parte el sueldo promedio de un soldador ronda los \$750.000 CLP/mes considerando 8h ,5 días y 4 semanas.

3.2.2.3. Costos de inspección y ensayos

Los costos por inspección y ensayos no muestran mayores cambios ya que en ambos escenarios de propuestas, la calidad y rigurosidad debe ser la misma en este ítem.

Tabla 27. Costos inspección y NDT (Propuesta 2)
Fuente: Cotizaciones y proveedores de la planta de celulosa.

Tipo de inspección y NDT	Costo estimado (USD)	Costo estimado (CLP)
Ensayo de UT en soldaduras	\$1.700	\$1.615.000
	\$1.700,00	\$1.615.000

3.2.2.4. Costo de producción

Se considerarán dentro de los costos de producción el uso de grúa para izaje de las placas soldadas, también andamios en los trabajos de calzar el parche al manto.

No se estiman pérdidas por parada de planta estando dentro los límites de vida remanente (RL) establecidos y tratándose de mantenimiento preventivo.

Tabla 28. Costos producción (Propuesta 2)
Fuente: Cotizaciones y proveedores de la planta de celulosa.

Concepto	Cantidades	Costo unitario	Total (USD)	Total (CLP)
Arriendo equipos de soldadura	3	80	\$1.680,0	\$1.596.000
EPP (equipos seguridad)	4	100	\$400,0	\$380.000
Detención programada	20 días	-	\$-	\$-
Izaje (grúa / pluma ligera + operador)	10 [días]	\$1.200	\$12.000,0	\$11.400.000
			\$14.080,0	\$13.376.000

3.3. IMPACTO EN LA PRODUCCIÓN

A continuación, se evaluará el impacto en la producción que representa la no-implementación del mantenimiento programado basado en la integridad estructural del activo (confiabilidad), frente a los costos de intervenir oportunamente a través de alguna de las 2 propuestas planteadas.

El principal dato por considerar es que la planta de celulosa produce alrededor de 2.1 millones de toneladas de celulosa al año. De esta manera:

- Cantidad de tanques : 2 unidades
- Diámetro : 26 [m]
- Altura : 11.840 [mm] = 11.84 [m]

$$Volumen_{capacidad} = \pi * r^2 * h = 6307.05 [m^3]$$

Ecuación 19.

La línea de caustificación de la planta posee una capacidad de 6.307 [m³] por tanque. Aunque en su operación diaria, la producción alcanza los 3.307 [m³/día] a 4.152 [m³/día]. Se considerará el valor más conservador de **3.307 [m³/día]**.

Por cada tonelada de celulosa producida, el 90%-95% de 1 tonelada será recuperada en solidos secos (ADs) de los que se obtendrá el licor verde.

Tabla 29. Datos recopilados de producción licor verde
Fuente: CMPC, CCS, y planta de celulosa.

Principales datos de producción		
Celulosa produccion	2.100.000	t/año
Licor verde (ρ) densidad	1.100	kg/m ³
Licor verde Eficiencia prod.	0.98	98% por m ³ de celulosa
Valor Celulosa	600	USD/t

Los datos entregados por CMPC y la cámara de comercio chilena (CCS), posicionan el valor la celulosa entre 600 ~900 [USD] por tonelada. Se utilizará un escenario de 600 [USD/t] y 2.1 millones/t de celulosa producida al año.

Con lo anterior se puede estimar la producción para la línea de caustificación mostrada en la siguiente tabla:

Tabla 30. Producción estimada de tanques Clarificadores 1 y 2.
Fuente: Elaborado a partir de tabla 29 y estados financieros (Arauco, I. (2023).

Almacenamiento	m3/año	t/año	t/día	t/h
Capacidad total	1.995.000	2.194.500	6.234	259,77
Tanque 1	997.500	1.097.250	3.117	129,9
Tanque 2	997.500	1.097.250	3.117	129,9

Se consideraron 45 días en total de paradas programadas durante el año para obtener la tasa de [t/día].

De este modo, observando la capacidad de producción traducida en metros cúbicos [m³] y toneladas [t] por año, es posible evaluar los impactos económicos ante una eventual detención forzada del tanque clarificador N°2, añadiendo el tiempo medio a reparar (MTTR) en los siguientes escenarios:

Tabla 31. Costos ineficiencia (impacto) estanque clarificador N°2.
Fuente: Elaborado a partir de producción estanque clarificador (planta de celulosa)

Días	MTTR [h]	Producción [Ton]	Costo no-producción [USD/Ton]
1	24	3.117	\$1.870.312,5
5	120	15.586	\$9.351.562,5
7	168	21.820	\$13.092.187,5
14	336	43.641	\$26.184.375,0

Al costo por ineficiencia ponderado anteriormente, se añadirá el impacto a la producción por daño medioambiental, seguridad del personal y mano de obra extra a emplear:

Tabla 32. Riesgos SHA asociados
Fuente: producción y costos empresa.

	Riesgos SHA asociados		
MTTR [h]	Costo ambiental [USD]	Costo seguridad [USD]	Costos adicionales operativos [USD]
24	\$421,1	\$105,3	\$526,32
120	\$2.105,3	\$526,3	\$526,32
168	\$2.947,4	\$736,8	\$526,32
336	\$5.894,7	\$1.473,7	\$526,32

Para el costo ambiental, de acuerdo con la SMA (superintendencia del medioambiente) las multas por daño medioambiental van desde 1 a 10 UTM.

Sobre los costos de seguridad, considerar evacuación del personal, traslados de lesionados, contención y mitigación de la fuga o derrame.

También se consideró en costos adicionales el arriendo y uso de equipos adecuados para la remoción y limpieza de químicos corrosivos, HH de los equipos encargados.

Finalmente, los costos por no implementar ninguna de las propuestas estudiadas a lo largo del capítulo, se resume en la siguiente tabla:

Tabla 33. Costo total (riesgo) acumulado
Fuente: Producción y costos estimados.

Días	Total acumulado [USD]
1	\$1.871.365
5	\$9.354.720
7	\$13.096.398
14	\$26.192.270

Los costos de ineficiencia y los riesgos asociados a la ejecución de las tareas correctivas nos permiten obtener el total acumulado de pérdidas por día, cuantificando el costo económico que traerían acciones correctivas sobre la falla funcional del activo, si se excede el periodo de vida remanente de 1 a 2 años establecidos en la evaluación.

3.4. **RESUMEN, COMPARATIVA Y OBSERVACIONES**

Ya desarrollada la evaluación del equipo y los costos asociados, se procederá a comparar objetivamente las 2 propuestas de mantenimiento preventivo para el anillo N°4 del estanque clarificador N°2, utilizando como criterio los principales indicadores (KPIs) desarrollados a lo largo de este capítulo. Estos corresponden a:

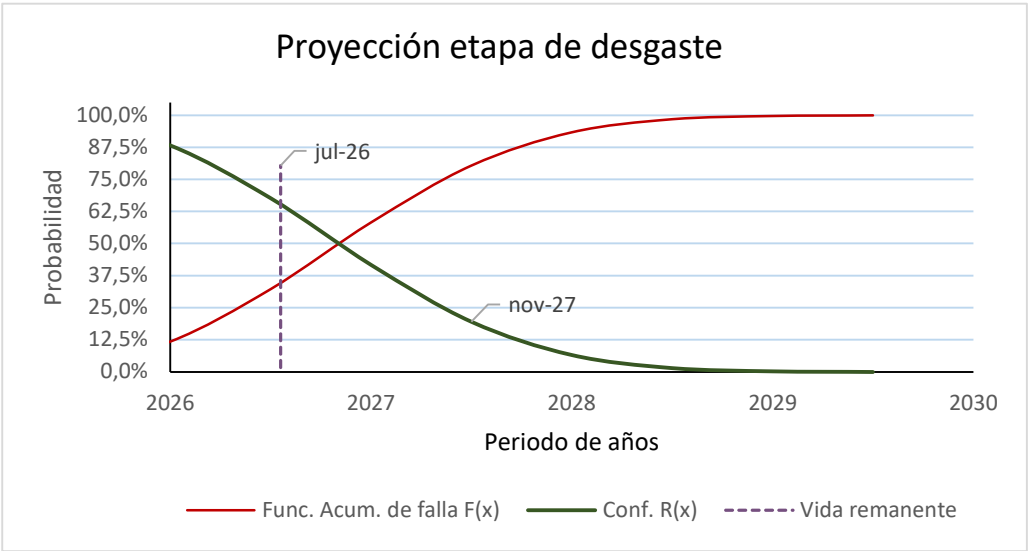
- Vida remanente: vida útil del activo proyectada (años)
- Costo total de implementación (USD)
- Frecuencia de mantenimiento: intervenciones necesarias de preventivos e inspecciones correspondientes a lo largo de la vida remanente del equipo.
- Impacto en producción: Licor verde sin producir (estimado en USD) por detenciones programadas y no programadas (MTTR).
- Mitigación del riesgo: Costos asociados a SHA (medioambiente, higiene, seguridad).

La evaluación de integridad ASME FFS-1/API579 (capitulo 2, [sección 2.3.3.](#)) logró determinar como primer indicador la vida remanente (RL) del equipo a una tasa de corrosión de 0.282 [mm/año].

La gráfica 3 y 4 ofrecen una mirada global de los resultados obtenidos en la evaluación, utilizando la distribución probabilística de Weibull para modelar la confiabilidad estimada en el periodo (años) 2025-2030. Los detalles de los parámetros y la metodología utilizada se muestran en el [Anexo 4](#) de este documento.

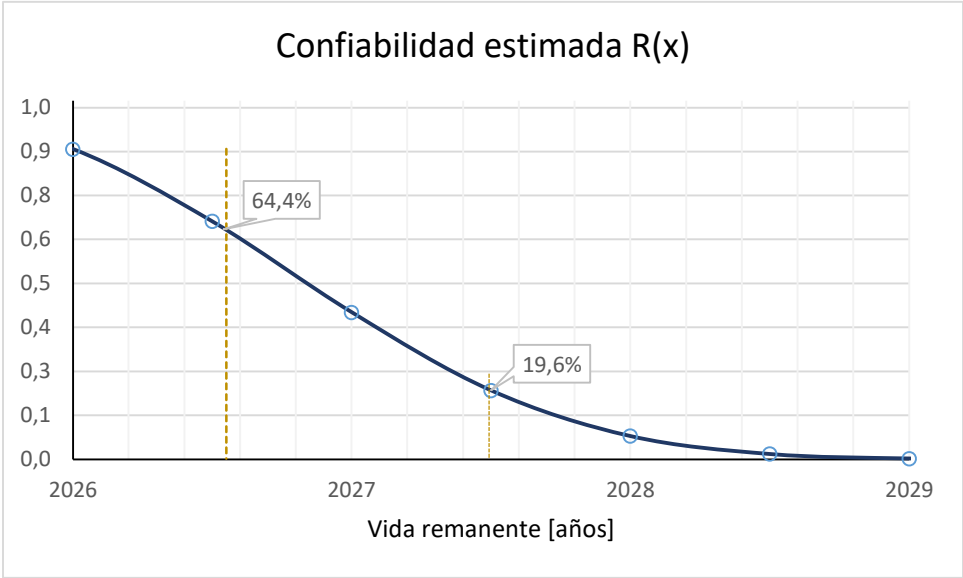
Gráfica 3. Escenario de desgaste de estanque N°2

Fuente: API 579 e ingeniería de confiabilidad sobre equipos. Crespo Márquez, A. 2012.



De esta manera, considerando la tasa de corrosión actual del anillo N°4 y una vida remanente de 2 años, la confiabilidad estimada para mediados de 2026 se encuentra en un 64%. Para mediados de 2027 la confiabilidad se estima en un 20%, es decir una probabilidad de falla del 80%.

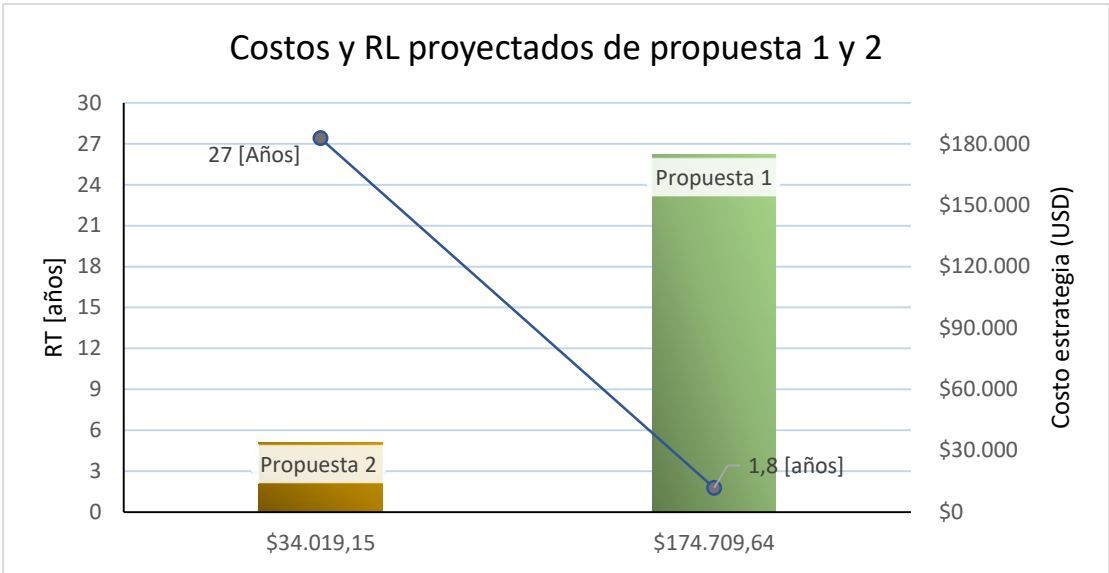
Gráfica 4. Confiabilidad estimada Anillo N°4
Fuente: API 579 e ingeniería de confiabilidad sobre equipos. Crespo Márquez, A. 2012.



3.4.1. Comparativa de propuestas

La gráfica 5 muestra una comparativa del costo de implementar cada propuesta, frente a los años de vida remanente (RL) que ofrece cada propuesta:

Gráfica 5. Costos de c/propuesta a lo largo de vida útil.
Fuente. Indicadores de vida remanente y costos.

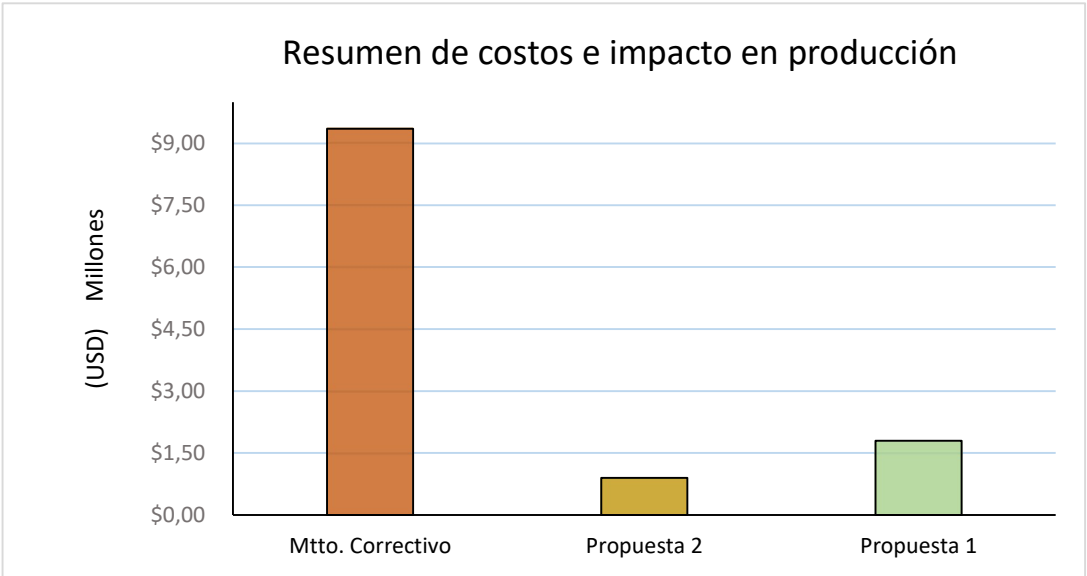


- Con una tasa de corrosión alrededor de los 0,282 [mm/año] la solución de la propuesta N°1 (correctivo diferido) genera un costo de \$ 175 mil USD, con una vida útil (RL) de 2 *años*, exigiendo inspecciones periódicas cada 6 meses.
- La propuesta N°2, mantenimiento preventivo para reemplazo completo del parche, es \$140 mil USD menos costoso, y considera una reparación del anillo del manto “as good as new”; extendiendo a 27 *años* la vida útil. Las inspecciones periódicas pueden programarse hasta cada 3 años.

3.4.2. Recomendaciones y observaciones finales

Los costos por no implementar medidas de mitigación y/o preventivas ascienden a los USD 9.3 millones \$ en solo 5 días, como se observa en la siguiente gráfica:

Gráfica 6. Impacto en producción
Fuente: Indicadores principales del capítulo 3



- Las acciones de mtto. correctivo (en naranja) consideró el impacto económico que tendrían 5 días de intervención sobre tanque clarificador N°2 (50% de eficiencia con 1 solo tanque en funcionamiento), con parada no programada y detención completa del estanque.
- El impacto en producción de la propuesta 1 (en verde) consideró 2 intervenciones no-programadas por año y de media jornada a causa de fugas. Considerando así 24 [h] de no-producción. A largo plazo (1 a 2 años) la confiabilidad disminuirá por debajo del 60%, y deberán ser instalados más parches a medida avanza la corrosión en zonas adyacentes.
- El impacto de la propuesta 2 (en amarillo), al tratarse de medidas de mantenimiento preventivo y programado, fue calculado considerando 1 inspección por cada año,

con una intervención de media jornada (6[h]) en caso de haber algún hallazgo. Este costo puede ser aún menos si se considera que las inspecciones en la práctica son echas cada 3 años.

En la tabla a continuación se consolidan ambas propuestas a través de los principales indicadores desarrollados a través del capítulo:

Tabla 34. Indicadores y desglose de propuestas
Fuente: Elaborado a partir de ASME FFS-1, costos y producción.

Indicadores	Propuesta 1 (Parche calzado)	Propuesta 2 (Reemplazo completo)
Costos de implementación (USD)	\$174.709,6 [USD]	\$ 34.019,2 [USD]
Vida útil proyectada	2 años	27 años
Frecuencia de mtto.	Cada 6 meses	Cada 1 a 3 años
Impacto Producción Verde ^{licor} (USD/año)	\$ 1.803.698[USD]	\$ 601.232[USD]
Monitoreo de la probabilidad de falla	Alto (requiere monitoreo continuo)	Bajo (estructura restaurada a estado inicial)

Comparando el impacto de costos de mantenimiento preventivo basados en la integridad mecánica del equipo (propuesta 2) y el impacto económico por implementar medidas mitigatorias (propuesta 1), frente a la no-implementación de ningún tipo de intervención, se generan pérdidas entre *USD 7.5 millones \$ a USD 8.4 millones \$*.

Finalmente, y partir de la evaluación técnica e ingenieril realizada a lo largo de este documento, se indica lo siguiente:

- La propuesta 1 requiere monitoreo continuo al tratarse de mantenimiento correctivo según condición. Sus costos pueden elevarse considerablemente si se exceden los 1.5 años de RL 2, ya que en ese caso podría requerirse 2 o más intervenciones por año, de media jornada (6h) para reparaciones e inspecciones. Esto se traduce en un impacto en no-producción que podría superar ampliamente los USD 1.8 millones \$ por año.
- La propuesta 2 implica una inversión razonable (USD 175.000 \$ aprox.) en función de la producción del estanque clarificador, proporciona mayor confiabilidad estructural y por lo tanto menor frecuencia de inspección e intervenciones. Aprovecha la parada de planta programada de 20 días, y logra mitigar hasta \$ 1.2 millones USD en paradas no programadas y costos SHA asociados a derrames o

posibles accidentes frente a la implementación de mantenimiento por condición (medidas mitigatorias).

- *Implementar la propuesta 2* es la solución técnica óptima, garantizando la continuidad operativa, minimizando riesgos estructurales y asegurando eficiencia económica a largo plazo.

CONCLUSIONES

La evaluación de integridad mecánica para este equipo demostró ofrecer indicadores cuantitativos muy útiles a la hora de tomar decisiones correctas en materias de producción de la planta, seguridad del personal y rentabilidad del negocio. De esta manera se logró determinar que la propuesta 2, mantenimiento preventivo por sustitución (reemplazo completo del anillo N°4), sería la óptima en términos de vida útil (27 años) y en costos en producción. Esta propuesta logra hasta \$ 1.2 millones USD de ahorro en impacto por producción al año frente a la propuesta 1.

Estar al tanto sobre los conceptos fundamentales en el desarrollo de un plan de inspección basada en la confiabilidad, permite añadir valor a la gestión de activos en el área de equipos estáticos. Conocer de manera ordenada, precisa, y con datos reales el comportamiento de una planta industrial otorgará mayor coherencia a la hora de tomar decisiones y optimizar los recursos de cada proceso relevante para la producción.

El tiempo y la continuidad operativa de un activo son altamente valoradas en la industria. Sin embargo, también es importante considerar los casos en que una evaluación conservadora no será suficiente, siendo necesaria una evaluación más profunda y detallada, invirtiendo el tiempo y recursos que sean necesario. Esta norma ofrece justamente esta adaptabilidad al momento de diagnosticar correctamente el equipo. Para el caso estudiado en este documento, valerse de las evaluaciones nivel 1 y 2, conducirá rápidamente a resolver las problemáticas mencionadas y asegurar la función operativa del activo.

El hecho de asegurar que un equipo continúe en operación es tan importante como identificar cuando este equipo no puede continuar, determinar las condiciones en que podría hacerlo considerando el deterioro existente, y los riesgos que conlleva no actuar preventivamente.

Cuando la información recabada se utiliza de manera adecuada en diagnosticar una falla presente o futura, y cuyos resultados puedan ser comprendidos tanto por el personal que opera, mandos intermedios y la alta gerencia, es posible generar un ambiente de cooperación, donde cada empleado suma, y donde el fruto del trabajo sea visibilizado y recompensado. Se hace por lo tanto valioso fomentar una cultura del mantenimiento, no asociada a labores engorrosas sino a procesos que traen consigo un propósito de crecimiento laboral y personal.

BIBLIOGRAFÍA

14224:2016, I. *Confiabilidad y Mantenimiento*. Obtenido de recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos.

American Petroleum Institute & American Society of Mechanical Engineers. (2021). API 579-1 / ASME FFS-1: Fitness-For-Service (2nd ed.). API Publishing Services.

API 650, S. (2013). American Petroleum Institute. API 650 Standard: *Welded tanks for oil storage* (12ª ed.) [PDF].

Arauco, C. (2024). Informe técnico central de autoprodutora [PDF]. Obtenido de: https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2024/06/2024-06-14_Informe_Minimo_Tecnico_Central_Autoprodutora_Arauco_MAPA_r2.pdf

Arauco, E. (2024), producción anual de celulosa en planta. Obtenido de: https://arauco.com/chile/este_es_arauco/mapa/

Arauco, M. (2019). Negocio de la celulosa [PDF]. Obtenido de <https://arauco.com/chile/wp-content/uploads/sites/14/2017/07/memoria-2019-6-abril.pdf>

Árauco, I. (2023). Reporte integrado Arauco [PDF]. Clientes, sustentabilidad y patrimonio. Obtenido de: <https://arauco.com/chile/wp-content/uploads/sites/14/2024/05/Reporte-Integrado-ARAUCO-2023.pdf>

Arauco, R. (2022). Resumen público de Arauco. Obtenido de: <https://arauco.com/wp-content/uploads/2024/05/Resumen-publico-PMOF-05-2023-004-VF.pdf>

Celulosa, M. (2024), valor en el mercado internacional. Obtenido de: <https://www.ex-ante.cl/que-hay-detras-del-alza-de-la-celulosa-que-supero-los-us-800-la-tonelada/>

Crespo Márquez, A., & Gómez Fernández, J. F. (2012). Maintenance management in network utilities: Modelos y métodos aplicados a la confiabilidad en equipos y sistemas (2º edición). Ingeniería de la confiabilidad. Escuela de ingenieros de la universidad de Sevilla: <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2757-4>

ENCE, E. Maderera y funcionamiento. Obtenido de: <https://madererafrouxeira.com/mejoras-ambientales-en-plantas-de-celulosa-sostenibilidad-y-uso-de-recursos/>

Estadísticas, F. (2025). Ministerio de Agricultura. Obtenido de: <https://wef.infor.cl/>

ESAB. (2025). Atom Arc® 7018 Stick Electrode (SMAW). Recuperado el 3 de octubre de 2025, de https://esab.com/us/nam_en/products-solutions/product/filler-metals/mild-steel/stick-electrodes-smaw/atom-arc-7018/?utm_source=chatgpt.com

Forestal, Ch. (2023). Instituto forestal en Chile, sector forestal y producción nacional. Obtenido de: <https://es.scribd.com/document/716993654/El-Sector-Forestal-2023?>

Grace, T. M., Malcolm, E. W., & Tran, H. (2008). Chemical recovery in the alkaline pulping processes. Obtenido de: <https://www.tappi.org/content/events/08kros/manuscripts/1-1.pdf>

Ingenieros, C. (2025). Generador de Precios: Obtenido de: https://chile.generadordeprecios.info/rehabilitacion/Estructuras/Acero/Refuerzos/EAZ010_Acero_laminado_en_caliente_para_ref_0_0_1_0_0_0_0_1.html?utm_source=chatgpt.com

Kraft, P. (2014). Wikipedia. Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Proceso_Kraft
Welding institute. (2025). Referencias a norma AWS D1.1 y norma API 650 – Welding design and calculation formulas. Kobelco Welding Education Center. Obtenido de: https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/calculating-weld-volume-and-weight-095?utm_source=chatgpt.com

Normativo, D. (2005). Manual de Construcción, inspección y reparación. Obtenido de: https://www.academia.edu/10706829/MANUAL_DE_TANQUES

Oerlikon. Manual del Soldador. Air Liquide Welding. Ediciones técnicas Oerlikon, varias ediciones (1990–2010). Obtenido de <https://es.scribd.com/document/327499451/Lincoln-Procedure-Handbook-of-Arc-Welding>

Tran, H. y Vakkilainen, E. (2022). Proceso químico de recuperación Kraft. Obtenido de: <https://www.tappi.org/content/events/08kros/manuscripts/1-1.pdf>

UNAV (2018). Fragilización por hidrógeno, Universidad de Navarra. En: <https://dadun.unav.edu/server/api/core/bitstreams/b960434c-4ca3-4452-b0d3-f728327b3826/content>

Universidad de Chile, (2018). Estudio creep ferro-elástico, Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas Departamento De Ingeniería Mecánica.

Valladolid, U. (2024). Producción de celulosa, proporción licor negro y verde. Obtenido de: <https://www.eii.uva.es/organica/qoi/tema-03.php>

ANEXOS

ANEXO 1: MECANISMOS DE DAÑO Y DEFECTOS (FLAWS)

A continuación, se ilustrarán los mecanismos de daño y defectos que aborda la norma API 579 de acuerdo con la **tabla 3 del capítulo 2**.

- API 579-1/ASME FFS-1 **partes 3, 4, y 5:**

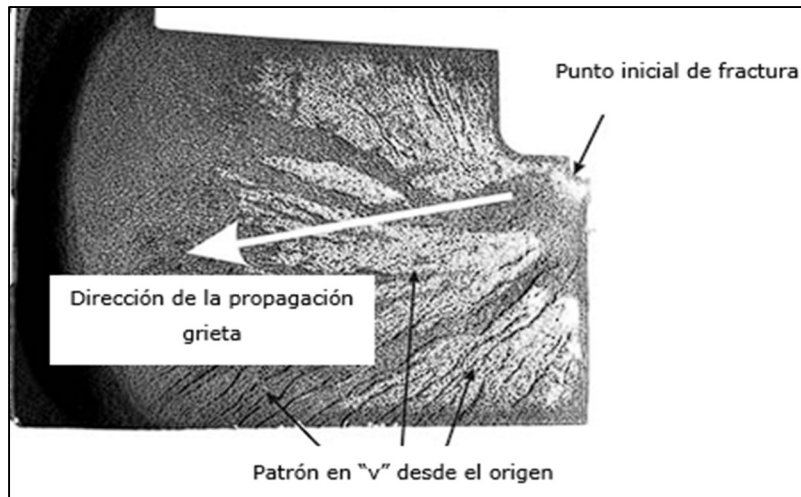


Figura A1. 1. Fractura frágil (en superficie)

Fuente: **Evaluación Parte 3** de API 579-1/ASME FFS-1



Figura A1. 2. Pérdida generalizada de metal (zonas indefinidas de tamaño variable y áreas extensas)

Fuente: **Evaluación Parte 4** de API 579-1/ASME FFS-1



Figura A1. 3. Pérdida localizada de metal (zonas demarcadas y definidas)

Fuente: **Evaluación Parte 5** de API 579-1/ASME FFS-1

- API 579-1/ASME FFS-1 **partes 6, 7, y 8:**



Figura A1. 4. Daño por picaduras: base interior de tanque atmosférico/ superficie de tubería)

Fuente: **Evaluación Parte 6** de API 579-1/ASME FFS-1

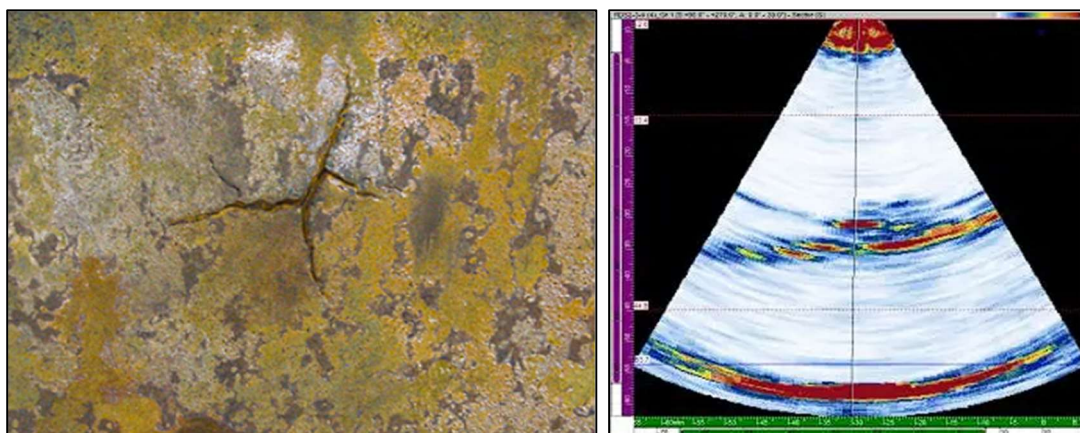


Figura A1. 5. Propagación HIC (Hydrogen induced cracking) / método de escaneo en diámetros interiores

Fuente: **Evaluación Parte 7** de API 579-1/ASME FFS-1 y UNAV (2018).

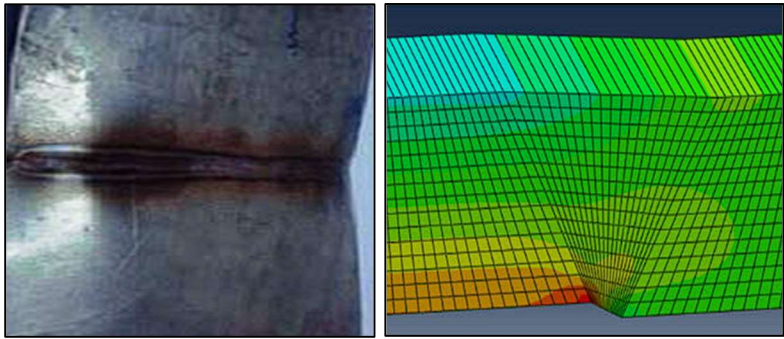


Figura A1. 6. Desalineación de soldadura y distorsiones /concentrador de esfuerzo (en rojo)
Fuente: **Evaluación Parte 8** de API 579-1/ASME FFS-1.

- API 579-1/ASME FFS-1 partes **9, 10, 11**:

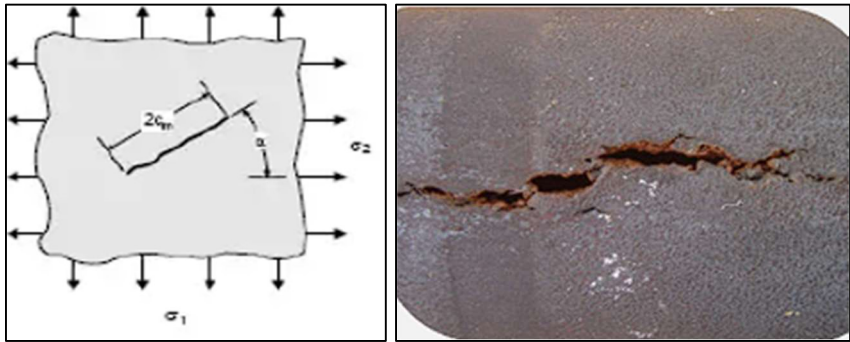


Figura A1. 7. Defectos similares a agrietamiento
Fuente: **Evaluación Parte 9** de API 579-1/ASME FFS-1.

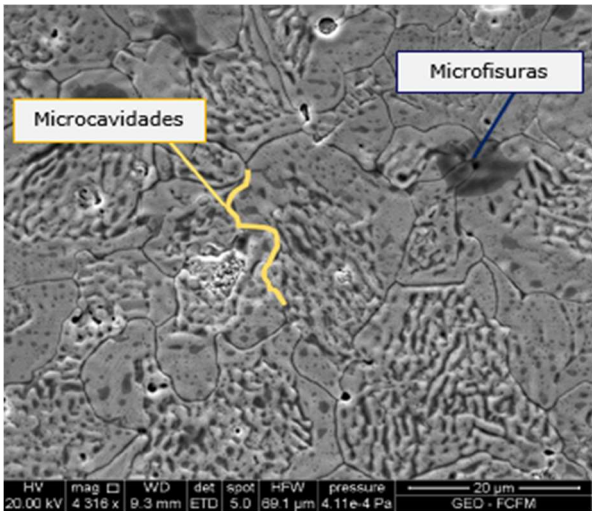


Figura A1. 8. Ponderación del daño a temperaturas altas y rango creep.
Fuente: **Evaluación Parte 10** de API 579-1/ASME FFS-1 y U. de Chile: Estudio creep ferro-elástico página 24., micrografía. A. Sepúlveda. (2018).



Figura A1. 9. Daños por incendio
Fuente: **Evaluación parte 11** API 579-1/ASME FFS-1

- API 579-1/ASME FFS-1 partes **12 y 13**:

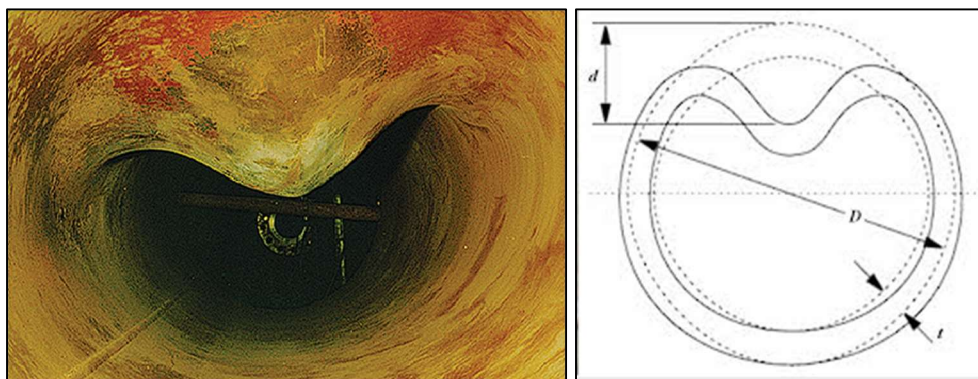


Figura A1. 10. Abolladuras, hendiduras, o combinación de ambas
Fuente: **Evaluación parte 12** API 579-1/ASME FFS-1



Figura A1. 11. Laminaciones
Fuente: **Evaluación parte 13** API 579-1/ASME FFS-1

ANEXO 2: DESGLOSE COSTOS SOLDADURA (PROPUESTA 1)

La cantidad de soldadura por metro lineal a depositar [Kg/ml], se obtuvo utilizando el área seccional y la densidad del metal. En conformidad a AWS D1.1 (lap joint, fillet welds) y API 650 (sección 9.3, apéndice F).

Se utilizará un electrodo revestido E7018. Para el cordón de soldadura se aplicará un “leg length” de 14 [mm]. El valor del electrodo en el mercado ronda los USD 8.00 \$ y muestra una eficiencia entre 60% al 75%.

Tabla 35. Desglose de material depositado y costos de soldadura
Fuente: ESAB. (2025), AWS D1.1 (lap joint, fillet welds) y API 650

Propuesta 1 (20% de la superficie del anillo 4)				
tc [mm]	ml de soldadura kg/ml	Soldadura dep (kg)	Kg de soldadura (75% rendimiento)	Costo final (USD) +10%
14	0,769	3,08	5,13	41,5

Respecto al proceso de soldadura, se consideró utilizar cordones de soldadura de filete (fillet welding) contra el estanque, donde el espesor permita la unión con el metal de aporte. En caso de necesitarse más de 1 parche, se ha determinado una junta en “V” para unirlos.

De acuerdo con el manual del soldador (Oerlikon, 2001), los metros lineales de soldadura [ml] y peso de metal depositado [Kg] dependen de la geometría de la unión y el espesor del material. La fórmula principal en el cálculo de soldadura depositada [Kg] se indica a continuación:

$$PMD [Kg] = \text{área}_{seccional} * longitud_{total} * \rho$$

Ecuación 20.

De este modo:

- Área seccional = filete (área cordón) = $(14^2) / 2 = 98 \text{ [mm}^2\text{]}$
- ρ = Densidad Acero ASTM A285 Gr C = $7850 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
- $Longitud_{total}$ = longitud del cordón de soldadura (metro lineal), considerando perímetro y altura de cada parche sobrepuestos al manto del tanque (ver **tabla 17**).

$Pmd = \text{Área seccional} \times \text{longitud} \times \text{densidad aporte.}$

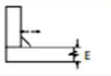
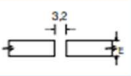
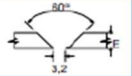
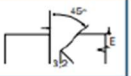
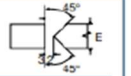
Unión de soldadura						
Espesor (E) mm	METAL DEPOSITADO (kg/ml) (acero)					
3,2	0,045	0,098				
6,4	0,177	0,190	0,380		0,358	
9,5	0,396		0,638		0,605	
12,5	0,708		1,168		1,066	
16	1,103		1,731		1,707	1,089
19	1,592		2,380	1,049	2,130	1,449
25	2,839		3,967	2,576	3,554	2,322
32				3,768		3,380
37,5				5,193		4,648
51				8,680		7,736
63,5				13,674		11,617
76				18,432		16,253

Figura A2. 1. Metal depositado según el tipo de unión

Fuente: Manual del soldador (Orekilon, 2001) y AWS D1.1 (lap joint, fillet welds)

Referencias gráficas sobre el cálculo considerado en la soldadura se muestran en las figuras A2.1 y A2.2.

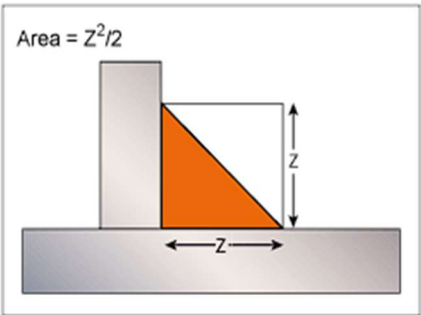


Figura A2. 2. Área del cordón de soldadura

Fuente: API 650 y Welding Institute. (2025).

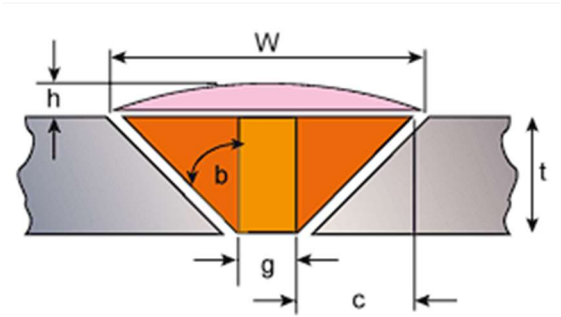


Figura A2. 3. Secciones y áreas una junta en V.

Fuente: API 650 y Welding Institute. (2025).

ANEXO 3: DESGLOSE COSTOS SOLDADURA (PROPUESTA 2)

La técnica de soldar GMAW/MIG, se ejecutará con junta “V” simple, con ángulo de 60° (30°por lado) y un biselado de 14 [mm] en el borde, incluido en el presupuesto a una eficiencia del 95%. Este procedimiento busca penetración total para que la unión quede con resistencia y continuidad equivalentes al acero A285 base. Todo lo anterior conforme a API 650 y AWS D1.1 / ASME IX para reemplazo completo con parche calzado y biselado.

Para obtener la soldadura depositada (Kg), se utilizó mismo método descrito en la propuesta 1, pero aplicado a soldadura GMAW/MIG:

$$PMD [Kg] = \text{área}_{seccional} * longitud_{total} * \rho$$

Ecuación 20.

El ítem de *soldadura por metro lineal [Kg/ml]*, se obtuvo como el producto entre el área seccional y la densidad (ρ) y su correspondiente homologación de unidades:

- *Área seccional* = 150 [mm²]. Este valor considera:
 - espesor (t = 14 [mm]),
 - root face (r =1.55[mm]),
 - gap = 2[mm],
 - β = 30°,
 - refuerzo de 20 mm².
- ρ = Densidad Acero ASTM A285 Gr C = 7850 [kg/m³].
- *Longitud_{total}* = 192,53 [m]. Longitud del cordón de soldadura.

De este modo se obtuvo:

Tabla 36. Desglose de material depositado y costos de soldadura
Fuente: ESAB. (2025), AWS D1.1 (lap joint, fillet welds) y API 650

Propuesta 2 (100% de la superficie del anillo 4)				
tc [mm]	ml de soldadura _{kg/ml}	Soldadura dep (kg)	Kg de soldadura (95% rendimiento)	Costo final USD (+10%)
14	1,178	226,70	238,04	\$2.166,2

ANEXO 4: PROYECCIÓN ETAPA DE DESGASTE Y CONFIABILIDAD

Con los datos reunidos sobre los antecedentes y evaluación de integridad del equipo (capítulo 2, [sección 2.3.3.](#)) es posible representar la probabilidad de que la falla ocurra, modelando un análisis Weibull, el cuál considera la siguiente relación de confiabilidad (Crespo Márquez, A. 2012):

$$F(x) = 1 - R(x) = 1 - e^{-(t/\alpha)^\beta}$$

Ecuación 21.

Donde:

- $F(x)$: Función de la probabilidad de falla
- $R(x)$: Confiabilidad del equipo
- e : Base del logaritmo natural
- t : Intervalo de tiempo de operatividad del equipo.
- α : Parámetro de escala. Puede corresponder a factor de seguridad, vida remanente, u otros indicadores de similar relevancia sobre la falla en un activo.
- β : Parámetro de forma. Corresponde a la etapa de desgaste que conduce a la falla. Su valor determina si la falla es temprana

En la tabla 38 a continuación, se detalla el criterio utilizado sobre los parámetros de escala y de forma de la representación Weibull para vida remanente:

Tabla 37. Parámetros Weibull
Fuente: Gestión de activos y. Crespo Márquez, A. 2012:

$t_{(i)} = 0.5 - 5$	Intervalo de tiempo considerando las condiciones actuales del equipo proyectadas en 5 años
$\alpha_{(escala)} = 2,0$	Valor de escala de acuerdo a literatura, corresponde a la vida remanente calculada del activo (2 años)
$\beta_{(forma)} = 2,5$	valor de β según la literatura, el modelo clásico para etapas de desgaste que aumentan en el tiempo según su mecanismo de deterioro (Crespo Márquez, A. 2012)

La probabilidad acumulada de falla $F(x)$ es posible definirla utilizando la función disponible en formato excel para weibull (DISTR.WEIBULL) y que requiere conocer los valores de α , β , y el intervalo de tiempo (i) en que se miden:

Tabla 38. Documentación de cálculos para la gráfica de desgaste
Fuente: API 579 e ingeniería de confiabilidad sobre equipos. Crespo Márquez, A. 2012.

Periodo	Intervalo (5 años)	F(x)	R(x)
		Probabilidad (acum.) de falla	Confiabilidad
2025,5	0,5	0,0308	96,9%
2026	1	0,1620	83,8%
2026,5	1,5	0,3856	61,4%
2027	2	0,6321	36,8%
2027,5	2,5	0,8257	17,4%
2028	3	0,9364	6,4%
2028,5	3,5	0,9826	1,7%
2029	4	0,9965	0,3%
2029,5	4,5	0,9995	0,1%
2030	5	0,9999	0,0%

En la tabla anterior hay que considerar que el periodo 2025,5 corresponde al año 2025 y 6 meses (julio), continuando así la interpretación para cada año hasta el periodo 2030.

Estimada la probabilidad de falla dentro del periodo (años) 2025-2030, se obtiene por complemento probabilístico la función de confiabilidad R(x) como muestran la **gráfica 3** y la **gráfica 4** del capítulo 3.