

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL DE MATERIALES



**IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE INSPECCIÓN BASADA
EN RIESGO EN ANÁLISIS CUALITATIVO PARA EQUIPOS ESTÁTICOS
DEL ÁREA DE FIBRA, CELULOSA ARAUCO - PLANTA ARAUCO**

Tesis para optar al grado de Ingeniero Civil de Materiales, por:

Joaquín Arduiz Gacitúa

Profesores Guía

Dr. Juan Pablo Sanhueza Araya

Dr. Felipe Sanhueza Gómez

Ingeniero Supervisor

Sr. Alain Sanhueza

©2023 Joaquín Arduiz

Ninguna parte de esta tesis puede reproducirse o transmitirse bajo ninguna forma o por ningún medio o procedimiento, sin permiso por escrito del autor.

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

AGRADECIMIENTOS

Al finalizar esta etapa fundamental en mi vida, quisiera agradecer a Celulosa Arauco, en especial al área de mantención predictiva y al jefe del área en ese entonces Rodrigo Mieres por brindarme la oportunidad de realizar esta memoria de título en esta prestigiosa empresa. Quisiera extender este agradecimiento al gran equipo de profesionales del área predictiva, Manuel Saavedra, Juan Carlos Montecinos, Arbin Cuevas, Ronald Beratto y en especial a su Ingeniero predictivo Alain Sanhueza, quien fue mi tutor en este proyecto y siempre tuvo la mejor disponibilidad y entusiasmo para ayudarme, su buena disposición y conocimientos entregados siempre brindándome una retroalimentación constructiva.

También quisiera agradecer a mi profesor guía el Dr. Juan Pablo Sanhueza, por su paciencia y constancia al momento de buscar esta oportunidad de memoria de título. Este trabajo no habría sido posible de lograr sin su compromiso y aportes profesionales.

También a mi familia más específicamente a mis abuelos, por siempre estar cuando los necesito, dándome su apoyo a pesar de los obstáculos en este largo camino, a mi madre que aunque ya no se encuentre con nosotros sé que siempre estará presente y resguardando por mí.

Agradecer a mis dos grandes amores, mi novia Elena Jara, por ser junto a mi hija María Trinidad Arduiz, el motor que me impulsa a seguir avanzando y sorteando todas las dificultades que se presentan, ellas son la razón de siempre levantarme y seguir adelante, más ahora en este nuevo camino como profesional.

Por último a mis amigos, por ser una parte importante dentro y fuera de lo académico, a mis amigos de toda la vida como Angelo Sagal, y mis amigos durante este camino académico Ignacio, Matías T, Eduardo, Andres, Matías Z, Martin, Matías H y Jorge. Gracias por sus palabras de apoyo y aliento en los momentos difíciles.

SUMARIO

Esta tesis se centra en la implementación de la metodología de Inspección Basada en Riesgo (RBI), específicamente mediante un análisis cualitativo, aplicado a 11 equipos estáticos en la industria de la celulosa, particularmente en la empresa Arauco. Estos equipos, que forman parte integral del área de fibra de la planta, son esenciales en el proceso de producción de celulosa y requieren de un mantenimiento y una evaluación de riesgos meticulosos para asegurar la continuidad operativa y la seguridad.

El estudio adopta la metodología de RBI según las normas API 580 y 581, con el objetivo de establecer una jerarquía de riesgos que permita optimizar recursos y mejorar la confiabilidad de los equipos. Se evaluó la probabilidad de fallo (PoF) y la consecuencia de fallo (CoF) de cada equipo, utilizando datos de inspecciones previas, historiales de mantenimiento y especificaciones técnicas para identificar y clasificar los mecanismos de deterioro potenciales, como la corrosión, la fatiga y la acumulación de material cristalizado.

A través de la aplicación de esta metodología cualitativa, se ha logrado una visión clara del estado actual de los equipos y se han identificado aquellos con el mayor riesgo. Esta información es crucial para dirigir los esfuerzos de mantenimiento hacia los equipos más críticos y para la toma de decisiones estratégicas con respecto a las operaciones de la planta, además de contar con la jerarquización de los equipos, para la planificación de futuras PGP (parada general de planta).

ÍNDICE

GLOSARIO	1
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	2
1.1. Objetivos	4
1.1.1. Objetivo General	4
1.1.2. Objetivos Específicos.....	4
CAPÍTULO 2. MARCO TEORICO.....	5
2.1. Definición y tipo de equipos estáticos.....	5
2.1.1. Funciones y relevancia.....	5
2.2. Estanques o tanques.....	7
2.2.1. Normas relevantes para estanques.....	7
2.3. Inspección y sus fundamentos	9
2.4. Inspección basada en riesgo (RBI).....	10
2.4.1. Alcance RBI.....	11
2.4.2. Importancia y aplicaciones.....	12
2.5. Mecanismos de daño	14
2.5.1. Tipos de mecanismos de daño	15
2.5.2. Mecanismos de daño en la industria papelera.....	19
2.5.3. Identificación y evaluación de mecanismo de daño.....	20

2.6. Técnicas de inspección	22
2.6.1. Inspección visual (VT)	23
2.6.2. Líquidos penetrantes (PT)	24
2.6.3. Partículas magnéticas (MT)	25
2.6.4. Inspección radiográfica (RT)	26
2.6.5. Ultrasonido (UT)	27
2.7. Riesgo	30
2.7.1. Matriz de riesgo	30
2.8. Análisis del riesgo	31
2.8.1. Análisis Cualitativo del Riesgo	32
2.8.2. Análisis Cuantitativo y Semicuantitativo del Riesgo	38
2.8.3. Análisis de riesgo y jerarquización	49
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	52
3.1. Introducción a la Metodología RBI	52
3.2. Recolección de datos e información	53
3.2.1. Validación de la información	54
3.2.2. Identificación funcional de los sistemas, sistematización y valoración de los mecanismos de deterioro	55
3.3. Análisis del riesgo	55
3.3.1. Análisis de riesgo Cualitativo (por sistemas)	56

3.4. Clasificación de los riesgos	56
3.5. Ejecución de planes de inspección y Acciones de mantenimiento	57
CAPÍTULO 4. ESTUDIO CASO: PLANTA CELULOSA ARAUCO	58
4.1. Área de Fibra: Descripción y Funciones	58
4.2. Equipos por Evaluar	59
4.3. Proceso de implementación RBI	61
4.3.1. Recolección de información.....	61
4.3.2. Sistematización	63
4.3.3. Cálculo de la Probabilidad de Falla.....	66
4.3.4. Cálculo de la Consecuencia de falla por Daños	71
4.3.5. Cálculo de la Consecuencia por Toxicidad	74
CAPITULO 5. RESULTADOS	77
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....	80
RECOMENDACIONES.....	83
REFERENCIAS	84
ANEXOS	86
Anexo 1: Mecanismos de daños en la industria papelera, área fibra.....	86
Anexo 2: Tabla para cálculo de los factores Pof y Cof	88
Tablas para cálculo consecuencia de daño	92

Tablas para cálculo consecuencia de salud	95
---	----

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Optimización de programas de inspección.....	14
Figura 2: Esferoidización, API 571 “Mecanismos de daño”.....	15
Figura 3: Corrosión bajo aislación (CUI), API 571 “Mecanismos de daño”.....	16
Figura 4: Corrosión galvánica, API 571 “Mecanismos de daño”.....	17
Figura 5: Corrosión por cenizas de combustible, API 571 “Mecanismos de daño”..	18
Figura 6: Corrosión caustica, API 571 “Mecanismos de daño”.....	18
Figura 7: Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment In the Pulp And Paper Industry	20
Figura 8: Identificación del Mecanismo de daño.....	21
Figura 9: Evaluación del Mecanismo de daño	22
Figura 10: Piezas inspeccionadas con ensayo de líquidos penetrantes (PT).....	24
Figura 11: Yugo Magnético, ensayo de partículas magnéticas (MT).....	25
.....	26
Figura 12: Radiografía digital pulso rayos x.....	26
Figura 13: Transductor para ensayo de ultrasonido	27
Figura 14: Factores de Riesgo, basado en API RP 580	30
Figura 15: Matriz de Riesgo, API Recommended Practice 581	31
Figura 16: Metodología Integral Para El Diseño Y Optimización De Planes De Inspección- Midopi	32

Figura 17: Clasificación de riesgos según NFPA	35
Figura 18: Proceso de liberación de fluido	37
Figura 19: Ejemplo Jerarquización de TK Licor Negro 241-22170.	50
Figura 20: Porcentaje de equipos vs Porcentaje de contribución al riesgo	51
Figura 21: Aplicación de la metodología RBI, para la generación de planes óptimos.	53
Figura 22: Implementación de la RBI en analisis cualitativo	60
Figura 23: Sistema de estanque de licor negro.....	64
Figura 24: Informe de inspección, estanque de licor negro.	65
Figura 25: Diagrama factores de Probabilidad de Falla en análisis cualitativo.	70
Figura 26: Factor químico, factor flash vs reactividad, API RP 581	72
Figura 27: Diagrama factores consecuencia de daño en análisis cualitativo.	73
Figura 28: Diagrama factores de consecuencia de salud en análisis cualitativo.....	76
Figura 29: Factor de probabilidad de falla, Estanque Licor Negro 241-22170	77
.....	77
Figura 30: Factor consecuencia de daño, Estanque Licor Negro 241-22170	77
.....	78
Figura 31: Factor consecuencia de salud, Estanque de Licor Negro 241-22170.....	78
Figura 32: Evaluación de riesgo, Estanque de Licor Negro 241-22170	79

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Función y relevancia equipos estáticos.....	5
Tabla 2: Normas de diseño, inspección y reparación de estanques	8
Tabla 3: Preguntas fundamentales	9
Tabla 4: Equipos estáticos que aplica la metodología.	11
Tabla 5: Mecánicas y metalúrgicas	15
Tabla 6: Perdidas de espesor	16
Tabla 7: Corrosión a alta temperatura.....	17
Tabla 8: Daños asistidos por el medio ambiente.....	18
Tabla 9: Correlación Mecanismo de daño vs Técnicas de inspección.....	28
Tabla 10: Categoría PoF por análisis cualitativo	34
Tabla 11: Categoría CoF de Daño por Explosión e incendio por análisis cualitativo	36
Tabla 12: Categoría CoF de Daño por Toxicidad por análisis cualitativo.	38
Tabla 13: Frecuencia genérica de fallas de componentes	41
Tabla 14: Evaluación del sistema gerencial.	45
Tabla 15: Niveles de consecuencia de falla	47
Tabla 16: Lista de equipos evaluados	59
Tabla 17: Características de los fluidos.	61
Tabla 18: Sumatoria de factores para cálculo de PoF	71

Tabla 19: Evaluación de los factores de consecuencia de daño.....	74
Tabla 20: Factor dispersión DIF (°C)	75

GLOSARIO

- **Boquilla:** Canal de acceso para la entrada o salida de un fluido a un recipiente.
- **Carcasa:** Estructura envolvente de un haz de tubular en un intercambiador de calor tubo – Carcasa.
- **Flange:** Componente ubicado en el extremo de una tubería o boquilla que sirve para la unión de dos secciones con el fin de formar un circuito continuo.
- **Flasheo:** Proceso rápido de evaporación o cambio de fase que ocurre cuando un líquido se despresuriza rápidamente y se convierte parcial o totalmente en gas
- **Manhole:** Punto de acceso de entrada de una persona al interior de un equipo con el fin de realizar una inspección, limpieza o reparación.
- **Manto:** Sección cilíndrica principal de un estanque de almacenamiento que alberga el contenido líquido o gaseoso. Su construcción es fundamental para la contención segura y eficiente de los materiales almacenados y está diseñada para resistir las fuerzas internas y externas, como la presión del contenido y las condiciones ambientales.
- **Pipe:** Cilindro hueco para el transporte de fluidos (gas o líquido) que sigue ciertas reglas de dimensión.
- **Piping:** Es un sistema de pipes usados para transportar fluidos desde una localización a otra
- **Recubrimiento (Lining):** Puede ser por planchas (plate lining) o por bandas (strip lining). Material metálico o no metálico instalado en el interior de un recipiente cuyas propiedades son más adecuadas para resistir los daños causados por el proceso que el material base. Es utilizado para reparaciones y solo se genera un continuo en los cordones o tapones de soldadura.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los factores principales que inciden directamente en la productividad del sector industrial, está asociada con el correcto funcionamiento de los equipos involucrados en los procesos productivos. La falla inesperada de un equipo puede llegar a tener repercusiones en la seguridad física de los operadores, afectar el medio ambiente, y la parte económica de la empresa.

Es así como el riesgo ha tomado fuerza a la hora de definir las tareas de mantenimiento en la industria, realizando periódicamente estas acciones para mantenerlos operando eficientemente.[1], [2]

La inspección basada en riesgo (RBI), es un enfoque que prioriza equipos o componentes críticos. Este tipo de metodología de la inspección analiza la probabilidad de falla y las consecuencias de estos, con el fin de desarrollar y modificar un plan de inspección. Además, de encontrarse relacionado con la Gestión de Activos Basada en Riesgos, la Gestión de Integridad Basada en Riesgos y Gestión Basada en Riesgos. [3], [4]

En la búsqueda constante por optimizar la eficiencia operativa y la seguridad en la industria de la celulosa, **Celulosa Arauco y Constitución S.A - Planta Arauco** ha reconocido la necesidad de implementar una gestión de mantenimiento predictivo que responda a los desafíos actuales del sector. La motivación de este esfuerzo es identificar y entender los mecanismos de deterioro activos y la criticidad asociada a estos, con el fin de jerarquizar de manera efectiva los equipos y componentes críticos de la planta.

El presente trabajo, solicitado por el antiguo superintendente del departamento de confiabilidad, surge como respuesta a una demanda específica de la empresa: establecer un marco de priorización basado en la metodología de Inspección Basada en Riesgo (RBI), alineado con los estándares de la industria y las mejores prácticas. Este estudio se ha llevado a cabo en paralelo con una empresa externa [5] , que ha

aplicado la metodología RBI a 67 equipos del área de licor y caustificación, estableciendo un precedente valioso y un modelo para la evaluación interna.

La metodología empleada está fundamentada en las directrices de la American Petroleum Institute (API), específicamente en las normas API 580 y 581, que proporcionan las bases teóricas y prácticas para la implementación de un análisis cualitativo de RBI. Además, se ha hecho uso de documentos complementarios como la API 571, API 575 y API 653 para profundizar en la inspección e identificación de mecanismos de deterioro.[6]

Los objetivos de la empresa se centran en la jerarquización de la criticidad de los equipos, buscando apoyar de manera efectiva las decisiones de la oficina de Mantenimiento Predictiva, parte integral del departamento de confiabilidad. La expectativa es que a través de este proceso, la planta Arauco no solo mejore su gestión de mantenimiento sino que también eleve los estándares de seguridad y confiabilidad en sus operaciones.

Este informe, refleja un claro compromiso de la empresa con la mejora continua y la excelencia operacional. Este trabajo no solo demuestra una estrategia proactiva en la inspección y la evaluación de la integridad de los equipos, sino que también establece un marco para la transformación estratégica de las prácticas de inspección.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Implementar la metodología de inspección basado en riesgo (RBI), con el fin de facilitar las labores de inspección de equipos y componentes, a través de la jerarquización de la criticidad de estos.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Identificar mecanismos de daño activos en equipos y componentes, en área fibra.
- Aplicar método cualitativo de análisis de riesgo, según practicas recomendadas API 580 y 581.
- Estimar el riesgo y definir criticidad de equipos evaluados.
- Definir la frecuencia de inspección para cada uno de los equipos evaluados.

CAPÍTULO 2. MARCO TEORICO.

2.1. Definición y tipo de equipos estáticos

Los equipos estáticos en la industria son aquellos que no tienen partes móviles en operación y están diseñados para contener, procesar o almacenar sustancias. Estos equipos son esenciales en diversas industrias, incluida la industria de la celulosa. [7]

2.1.1. Funciones y relevancia

En el ámbito de la industria y específicamente en relación con los equipos estáticos, la **función** se refiere a la actividad o tarea principal de un equipo que está diseñado para desempeñar, como contener, procesar o almacenar sustancias. La **relevancia**, por su parte, subraya la importancia de esa función específica dentro del proceso industrial global. Es una medida cómo la operación adecuada y el mantenimiento de ese equipo estático pueden influir en la eficiencia del proceso, la calidad del producto, la seguridad y otros aspectos críticos. En conjunto, la función y relevancia de un equipo estático ofrecen una visión clara de su papel y valor dentro de un sistema de producción. [8]

Tabla 1: Función y relevancia equipos estáticos

EQUIPOS ESTÁTICOS	FUNCIÓN	RELEVANCIA
Estanques o Tanques	Almacenar líquidos como pulpa o productos químicos.	Gestión adecuada de insumos y productos, continuidad del proceso, evitar interrupciones por falta de almacenamiento.

Recipientes a Presión	Contener gases o líquidos a alta presión.	Procesos que requieren condiciones de presión controladas, seguridad y eficiencia del proceso.
Intercambiadores de calor	Transferir calor.	Control de temperatura en procesos, calidad del producto, eficiencia energética.
Torres de enfriamiento	Enfriar agua mediante evaporación.	Proveer agua de enfriamiento, optimizar consumo de agua y energía.
Columnas o Torres de Destilación	Separar mezclas de líquidos.	Purificación y concentración de productos y subproductos.
Reactores	Llevar a cabo reacciones químicas.	Transformación de materias primas en productos, optimizar condiciones de reacción.
Hornos y Calderas	Generar calor.	Proveer energía térmica para procesos, continuidad y operativa, eficiencia energética.

Fuente: Elaboración propia, basado en [9]

2.2. Estanques o tanques

En la industria de la celulosa, un estanque se define generalmente como un contenedor de almacenamiento grande y diseñado para contener líquidos a presión atmosférica o ligeramente superior. Según la norma API 650, estos estanques están diseñados para almacenar productos derivados del petróleo, pero los principios de diseño y construcción pueden aplicarse a estanques en otras industrias, como la celulosa, especialmente cuando se trata de almacenar líquidos como licor negro y otros químicos utilizados en el proceso de fabricación de celulosa.

La norma API 650 aborda aspectos como el diseño, la fabricación y la instalación de estanques de almacenamiento, incluyendo consideraciones para materiales, diseño estructural, soldaduras, inspecciones y pruebas.[10]

2.2.1. Normas relevantes para estanques

La inspección y mantenimiento de estanques en la industria son cruciales para garantizar la seguridad y eficiencia operativa. Las normas establecidas por el “*American Petroleum Institute*” proporcionan directrices detalladas para el diseño, inspección y mantenimiento de estos estanques. [6]

Tabla 2: Normas de diseño, inspección y reparación de estanques

API 650 - "Estanques soldados para almacenamiento de petróleo"	Norma para el diseño y construcción de estanques de almacenamiento. Aunque se centra en el almacenamiento de petróleo, sus principios son aplicables a estanques en diferentes industrias.
API 653 - "Inspección, reparación, alteración y reconstrucción de estanques"	Específica para la inspección, reparación, modificación y reconstrucción de estanques de almacenamiento. Esta norma es crucial para garantizar la integridad y seguridad de los estanques a lo largo de su vida útil.
API 510 - " Inspección, clasificación, reparación y alteración en servicio Inspección, reparación, alteración y reconstrucción de estanques "	Aunque se centra en recipientes a presión, algunos de sus principios y prácticas de inspección pueden ser relevantes para estanques que operan a presiones superiores a la atmosférica.
API 570 - " Inspección, clasificación, reparación y modificación en servicio de sistemas de tuberías "	Proporciona directrices para la inspección y mantenimiento de sistemas de tuberías, que pueden ser parte integral de las instalaciones de estanques.

Fuente: Elaboración propia, basado en [6]

2.3. Inspección y sus fundamentos

El conjunto de actividades desarrolladas para verificar, que los materiales, procesos de fabricación, construcción, evaluación, pruebas y reparaciones. Estén de acuerdo con los códigos de ingeniería aplicables.

Se establecen cuatro preguntas fundamentales a responder:

Tabla 3: Preguntas fundamentales

Tipos de daño	Descripción del daño
1) ¿Qué tipos de daño se producen?	Aquí se describen los tipos específicos de daños que pueden ocurrir, como fisuras, corrosión, desgaste, etc.
Detección	Métodos y localización
2) ¿Dónde deben detectarse?	Se especifican las áreas críticas o componentes donde los daños son más probables o peligrosos.
3) ¿Cómo pueden detectarse?	Métodos de detección como inspección visual, pruebas no destructivas, monitoreo de sensores, etc.
Inspección	Frecuencia y tiempos

4) ¿Cuándo y con qué frecuencia debe inspeccionarse?	Se define un cronograma de inspección basado en factores como el uso, la edad de la estructura o componente, las condiciones del entorno, etc.
--	--

Fuente: Elaboración propia, basado en [11]

Siendo una herramienta esencial en la industria para garantizar la integridad y seguridad de los equipos y estructuras.

2.4. Inspección basada en riesgo (RBI)

Es un enfoque estructurado y holístico utilizado en la industria para gestionar y priorizar las inspecciones de equipos y sistemas. A diferencia de los métodos tradicionales de inspección que se basan en intervalos de tiempo fijos o ciclos operativos, la RBI se centra en evaluar y clasificar los riesgos asociados con cada equipo o sistema. Esta evaluación se basa en dos componentes principales: **la probabilidad de fallo y la consecuencia potencial de ese fallo.**

La probabilidad de fallo se determina analizando factores como la edad del equipo, su historial de mantenimiento, las condiciones operativas y otros factores que puedan influir en su integridad y fiabilidad. Por otro lado, la consecuencia del fallo se refiere al impacto potencial que un fallo podría tener, no solo en términos de pérdidas económicas, sino también en aspectos como la seguridad, el medio ambiente y la operatividad del proceso.

Una vez evaluados estos componentes, se establece una matriz de riesgo que ayuda a determinar qué equipos requieren inspecciones más frecuentes o rigurosas y cuáles pueden tener intervalos de inspección más prolongados sin comprometer la seguridad

o la eficiencia. El objetivo principal de la RBI es garantizar que los recursos se utilicen de manera óptima, enfocando los esfuerzos de inspección en áreas donde el riesgo es más significativo, al tiempo que se minimizan los costos y se mejora la seguridad y la eficiencia operativa. [3]

2.4.1. Alcance RBI

La inspección basada en riesgo de API está principalmente enfocada para equipos estáticos presentes en la industria del petróleo y refinería, aunque no limita su utilización en industrias de otras categorías si los equipos están dentro del alcance de la inspección.

Tabla 4: Equipos estáticos que aplica la metodología.

APLICA	NO APLICA
<ul style="list-style-type: none"> • Recipientes sujetos a presión: Todos los componentes sometidos a presión. • Tanques de almacenamiento: Atmosféricos y presurizados. • Tuberías de proceso: Tubos y componentes de los tubos. • Equipos rotatorios: Componentes sometidos a presión. • Calentadores y quemadores: Componentes presurizados. 	<ul style="list-style-type: none"> • Instrumentos y sistemas de control. • Sistemas eléctricos. • Sistemas estructurales. • Componentes de maquinaria (excepto bombas y compresores cubiertos).

<ul style="list-style-type: none"> • Intercambiadores de calor: Cuerpos, cabezas, canales y haz de tubos. • Dispositivos de alivio de presión. 	
--	--

Fuente: Elaboración propia, basado en [3]

2.4.2. Importancia y aplicaciones

Su importancia y aplicación no solo mejora la seguridad y la eficiencia operativa, sino que también optimiza los recursos de inspección. Este enfoque estratégico es fundamental para identificar y priorizar los riesgos asociados con equipos y sistemas industriales.

2.4.2.1. Importancia

- **Optimización de Recursos:** La RBI permite a las industrias asignar recursos de inspección de manera más eficiente, centrándose en los equipos con mayor riesgo y potencial de fallo.
- **Mejora de la Seguridad:** Al identificar y priorizar áreas de alto riesgo, la RBI contribuye a reducir la probabilidad de incidentes catastróficos, protegiendo tanto a los trabajadores como al medio ambiente.
- **Extensión de la Vida Útil del Equipo:** Al identificar áreas de preocupación y posibles mecanismos de daño, las empresas pueden tomar medidas preventivas para prolongar la vida útil de sus equipos.
- **Reducción de Costos:** Al evitar fallos no planificados y optimizar los intervalos de inspección, las empresas pueden reducir costos asociados con paradas no programadas y reparaciones de emergencia.

- **Cumplimiento Normativo:** La implementación de RBI ayuda a las empresas a cumplir con regulaciones y estándares industriales, evitando posibles sanciones o multas.

2.4.2.2. Aplicaciones

- **Industria Petrolera y Petroquímica:** La RBI se utiliza ampliamente para gestionar la integridad de tanques de almacenamiento, tuberías, reactores y otros equipos críticos.
- **Plantas de Energía:** La RBI se aplica en calderas, intercambiadores de calor y otros equipos para garantizar la seguridad y eficiencia operativa.
- **Industria Química:** La RBI ayuda a gestionar riesgos asociados con reactores químicos, columnas de destilación y otros equipos que manejan sustancias peligrosas.
- **Plantas de Celulosa y Papel:** En este contexto, la RBI puede ser aplicada para gestionar la integridad de estanques de almacenamiento, tuberías y otros equipos críticos.
- **Industrias Alimentarias y Farmacéuticas:** La RBI se utiliza para garantizar la calidad del producto, evitando contaminaciones y garantizando la integridad de los equipos.
- **Infraestructura y Transporte:** La RBI se aplica en puentes, túneles, vías férreas y otros elementos críticos para garantizar la seguridad y prolongar su vida útil.

La Inspección Basada en Riesgo (RBI) ha demostrado ser una herramienta valiosa en diversas industrias, permitiendo una gestión de activos más eficiente y segura. Su aplicación adecuada puede resultar en operaciones más seguras, confiables y rentables.

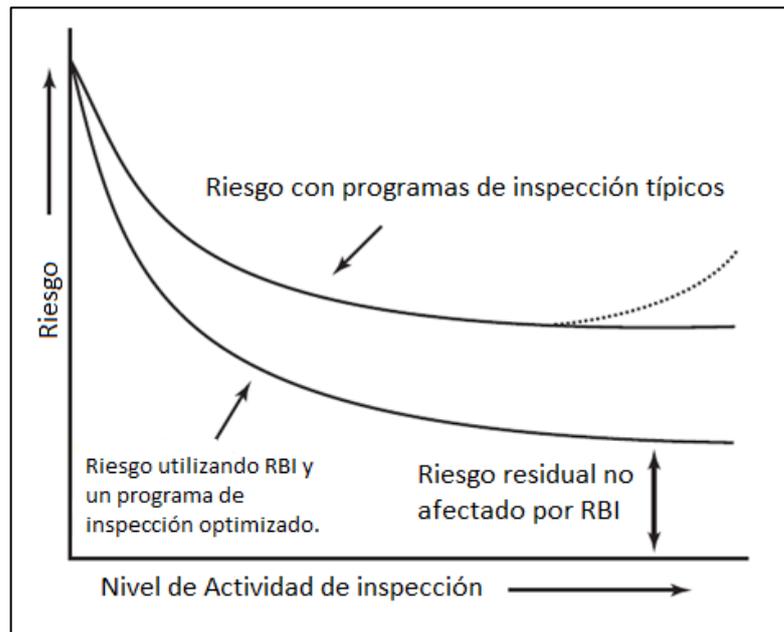


Figura 1: Optimización de programas de inspección [3]

2.5. Mecanismos de daño

Los mecanismos de daño o deterioro según la práctica recomendada API RP 581 se definen como procesos que inducen cambios perjudiciales a lo largo del tiempo, afectando las condiciones o propiedades mecánicas de los materiales. Estos mecanismos suelen ser graduales, acumulativos y en algunos casos irreversibles. Entre los mecanismos de deterioro considerados por el estándar API RP 581 se incluyen: adelgazamiento, daños en componentes con revestimientos internos, daños externos, agrietamiento por corrosión bajo tensión, ataque por hidrógeno a alta temperatura, y fatiga mecánica (solo en tuberías). De esta forma, para tener una referencia más específica sobre los tipos y mecanismos de deterioro se recurre a consultar la práctica recomendada API RP 571.

2.5.1. Tipos de mecanismos de daño

El Instituto Americano del Petróleo en su práctica recomendada API RP 571 (Mecanismos de deterioro que afectan equipos estáticos), indica los mecanismos de daño que ocurren en las industrias de la pulpa y el papel, generación de electricidad, refinación y petroquímica.

En la norma se encuentra el concepto específico de cuál es el problema que se está presentando (mecanismo de daño), cuáles son los materiales susceptibles y el método de inspección y monitoreo que pueden ser aplicados, aunque no descarta que puedan existir otros mecanismos de daño presentes según el tipo de industria. [12]

Los mecanismos de daño que brinda la norma están agrupados en 4 familias, estas son:

2.6.1.1. Mecánicas y metalúrgicas

Son asociados a todo proceso de daño en la microestructura de los equipos y/o componentes, estos son:

Tabla 5: Mecánicas y metalúrgicas

<ul style="list-style-type: none">a) Grafitizaciónb) Esferoidizaciónc) Fragilización por revenidod) Refuerzo por envejecimientoe) Fragilización 885°Ff) Fragilización por fase sigmag) Termofluenciah) Fatiga térmicai) Fractura por calentamiento localizadoj) Choque térmicok) Corrosión/erosión	 <p><i>Figura 2: Esferoidización, API 571 “Mecanismos de daño”.</i></p>
--	---

<ul style="list-style-type: none"> l) Erosión por cavitación m) Fatiga n) Fatiga inducida por vibración o) Degradación de refractarios 	
--	--

Fuente: Elaboración propia, basado en [12]

2.5.1.2. Pérdidas de espesor (uniformes y localizadas)

Se caracterizan por un proceso de degradación del material desde la parte interna (interior del equipo o componente hacia afuera) o de la parte externa (exterior del equipo o componente hacia adentro).

Tabla 6: Pérdidas de espesor

<ul style="list-style-type: none"> a) Corrosión galvánica b) Corrosión atmosférica c) Corrosión bajo aislación (CUI) d) Corrosión por agua de enfriamiento e) Corrosión por condensados de agua de caldera f) Corrosión por CO₂ – Oxido de carbono g) Corrosión por punto de rocío de gases de proceso 	 <p>Figura 3: Corrosión bajo aislación (CUI), API 571 “Mecanismos de daño”.</p>
---	--

<ul style="list-style-type: none"> h) Corrosión inducida por compuestos microbiológicos en combustibles (MIC) i) Corrosión en equipos soterrados j) Corrosión caustica k) Corrosión por ataques a elementos aleantes 	 <p><i>Figura 4: Corrosión galvánica, API 571 “Mecanismos de daño”.</i></p>
--	---

Fuente: Elaboración propia, basada en [12]

2.5.1.3. Corrosión a alta temperatura (400°F o 204°C)

Se presenta debido a la corrosión química, esto ocurre puesto que a estas temperaturas no existe el electrolito que sirva como conductor, estos mecanismos de daños son:

Tabla 7: Corrosión a alta temperatura

<ul style="list-style-type: none"> a) Oxidación b) Sulfatación c) Carburación d) Descarburación e) Pulverización del metal f) Corrosión por cenizas de combustible g) Nitruración 	
---	--

	<p><i>Figura 5: Corrosión por cenizas de combustible, API 571 “Mecanismos de daño”.</i></p>
--	--

Fuente: Elaboración propia, basado en [12]

2.5.1.4. Asistidas por el medio ambiente

Estas fallas son producidas por la exposición de los equipos y/o componentes a ambientes agresivos. Los cuales tienden a formar grietas tanto en la matriz, como uniones soldadas.

Tabla 8: Daños asistidos por el medio ambiente

<ul style="list-style-type: none"> a) Fractura por corrosión bajo esfuerzo con cloruros b) Corrosión fatiga c) Corrosión bajo esfuerzo caustico (fragilización caustica) d) Corrosión bajo esfuerzo por amoniaco e) Fragilización por metal liquido f) Fragilización por hidrogeno 	 <p style="text-align: center;"><i>Figura 6: Corrosión caustica, API 571 “Mecanismos de daño”.</i></p>
--	---

Fuente: Elaboración propia, basado en [12]

2.5.2. Mecanismos de daño en la industria papelera

La industria del papel, caracterizada por su complejidad y diversidad en procesos y equipos, enfrenta constantemente desafíos relacionados con el deterioro de sus infraestructuras. Un aspecto crucial en la gestión de la integridad y la seguridad operacional de esta industria es la comprensión y monitoreo de los mecanismos de deterioro que afectan sus equipos y estructuras. Estos mecanismos de deterioro no solo tienen implicaciones directas en la eficiencia y vida útil de los equipos, sino que también son determinantes en la gestión de riesgos y en la implementación de estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo.

En este contexto, los mecanismos de deterioro en la industria del papel se refieren al conjunto de procesos físicos, químicos y mecánicos que provocan la degradación o daño de los materiales y equipos utilizados en la producción de papel. Estos mecanismos incluyen, la corrosión en diversas formas, la erosión, la fatiga de materiales, y la degradación química, entre otros. Cada uno de estos mecanismos posee características particulares y se ve influenciado por una variedad de factores operacionales y ambientales, como la composición química de los materiales, las condiciones de temperatura y presión, la presencia de agentes corrosivos, y la velocidad y naturaleza del flujo de los líquidos y gases en contacto con los equipos.[13]

La **identificación precisa de estos mecanismos**, así como la comprensión de sus causas y efectos, es fundamental para la implementación efectiva de la Inspección Basada en Riesgo (RBI). Este enfoque, centrado en la evaluación y gestión de los riesgos asociados al deterioro de los equipos, permite desarrollar estrategias de inspección y mantenimiento que optimizan la seguridad y eficiencia operativa, minimizando al mismo tiempo los costos y el tiempo de inactividad. [13]

Dentro del análisis de mecanismos de deterioro en la industria papelera, un componente crucial es el entendimiento de las operaciones y los procesos donde estos mecanismos tienen mayor probabilidad de ocurrencia. *La figura 1* extraída del archivo WRC 488-2004 (Anexo 1), ilustra un diagrama de flujo de un digestor continuo, una

pieza central en la producción de celulosa. Este diagrama permite identificar dónde y cómo los diversos mecanismos de deterioro, como la fisuración por corrosión bajo tensión, la erosión y la corrosión, entre otros, pueden afectar los distintos componentes del sistema. Cada uno de estos mecanismos está asociado a distintas etapas del proceso y equipos, lo que enfatiza la importancia de una estrategia de inspección basada en riesgo bien fundamentada y alineada con las normativas API RP 580 y 581 para garantizar la integridad y la operatividad segura de la planta. [13]

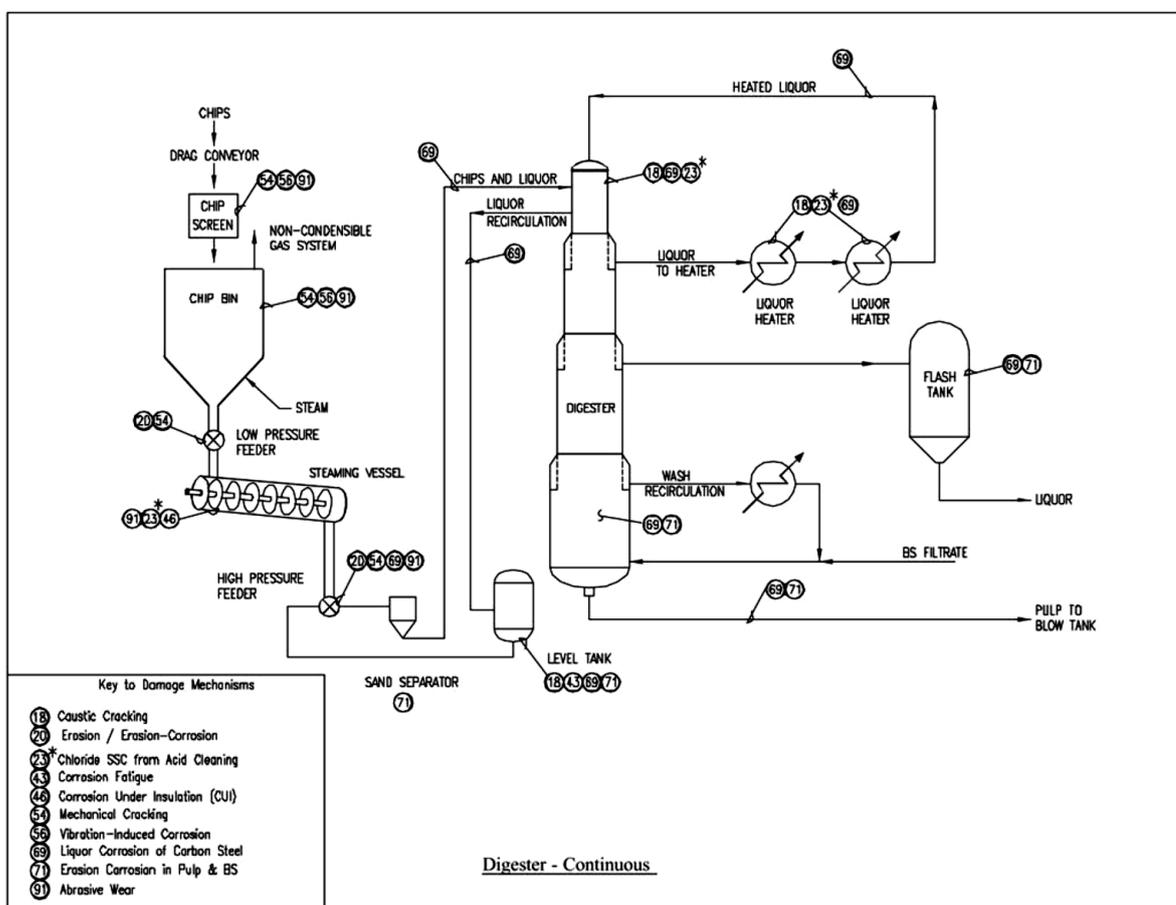


Figura 7: *Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment In the Pulp And Paper Industry* [13]

2.5.3. Identificación y evaluación de mecanismo de daño

La identificación y evaluación de mecanismos de daño son procesos clave en la implementación de la metodología RBI. Estos procesos implican el reconocimiento y

análisis de los diferentes tipos de deterioro que pueden afectar a los equipos y sistemas dentro de una instalación industrial.

2.5.3.1. Identificación de Mecanismos de Daño

Esta etapa consiste en determinar los posibles mecanismos de deterioro que pueden ocurrir en los materiales y equipos, basándose en su diseño, materiales de construcción, condiciones operativas, y el entorno en el que operan. Los mecanismos de daño comunes incluyen corrosión, erosión, fatiga, fractura, entre otros.



Figura 8: Identificación del Mecanismo de daño, elaboración propia según [3]

2.5.3.2. Evaluación de Mecanismos de Daño

Una vez identificados los mecanismos de daño, se realiza una evaluación para determinar su potencial impacto en la integridad y fiabilidad de los equipos. Esta

evaluación considera la probabilidad de ocurrencia del daño y las posibles consecuencias de un fallo. La evaluación ayuda a priorizar las acciones de inspección y mantenimiento, y a desarrollar estrategias para mitigar o controlar los riesgos asociados.



Figura 9: Evaluación del Mecanismo de daño, Elaboración propia según [3]

2.6. Técnicas de inspección

Existen diferentes técnicas de inspección, las cuales se emplean dependiendo del mecanismo de daño presente en el equipo y/o componente a inspeccionar. Por lo que es fundamental tener completo conocimiento de dicho mecanismo de daño.

Las técnicas de inspección ocupadas con mayor frecuencia en la industria son las que se refieren a los ensayos no destructivos (END). De esta forma algunas de las razones por las cuales se utilizan con tanta frecuencia son:

- Asegurar la confiabilidad y prevenir fallas prematuras de materiales durante su servicio.
- Identificaciones o separación de materiales.
- Identificación de propiedades de los materiales y la confiabilidad con uniformidad en la producción.
- Ahorro en los costos de producción.
- Eliminar materia prima defectuosa.
- Mejorar los sistemas de producción.
- Asegurar la calidad funcional de los sistemas en servicio, en plantas o diversos tipos de instalaciones.

Para la selección de un método de END adecuado es necesario considerar el tipo, tamaño y orientación de la discontinuidad; tamaño y forma del objeto a inspeccionar; y las características del material a ser inspeccionado. De esta forma algunas técnicas utilizadas son:

- Inspección visual (VT)
- Líquidos penetrantes (PT)
- Partículas magnéticas (MT)
- Inspección radiográfica (RT)
- Inspección por Ultrasonido (UT)

2.6.1. Inspección visual (VT)

El método de inspección visual tiene como propósito fundamental detectar deterioro global o grandes defectos para un sistema, unidad o componente. La VT usualmente no requiere bastante acercamiento al objeto o sistema y la limpieza no es obligatoria. Con este END es posible detectar:

- Deterioro en la pintura.
- Problema en la aislación.
- Fugas en paredes de tuberías, soldaduras y conexiones.

- Deformación local y global.
- Soportes inestables.

2.6.2. Líquidos penetrantes (PT)

El método PT consiste en aplicar un líquido con alta características de humectabilidad sobre la superficie de una pieza bajo inspección.

El líquido penetrante “PENETRA” al interior de indicaciones abiertas a la superficie a través de la acción de CAPILARIDAD y otros mecanismos. El exceso de penetrante es removido de la superficie y un revelador es aplicado para extraer el penetrante atrapado de vuelta a la superficie.

Para finalizar la inspección visual (VT), es la encargada de detectar las indicaciones presentes en la pieza, las cuales pueden ser todo tipo de defectos que están abiertos a la superficie.



Figura 10: Piezas inspeccionadas con ensayo de líquidos penetrantes (PT).

2.6.3. Partículas magnéticas (MT)

Método para localización de defectos superficiales y sub-superficiales aplicable exclusivamente a materiales magnéticos.

Su operación consiste en magnetizar el área a evaluar y verter partículas magnéticas, las cuales al entrar en contacto con el campo magnético se aglomeran en el contorno de la discontinuidad que estén perpendicular a este, indicando la localización, forma y extensión de la fisura o defecto. Estas partículas pueden ser de tipo fluorescente, no fluorescente, seco u acuoso y pueden estar en suspensión en líquidos como aceite o agua. Se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- La pieza debe ser magnética.
- Se debe desmagnetizar antes y después de realizada la prueba.
- La pieza o área debe estar esencialmente limpia, seca y libre de contaminantes como suciedad, aceite, grasa, óxido suelto, pelusas, pinturas gruesas, fundente de soldadura, entre otras.
- Si la pieza esta recubierta con elementos de tipo no conductivos, estos deben ser delgados con un espesor no mayor a 0.005 mm, en caso contrario, se debe demostrar que este no interfiere con la medición.
- Si la pieza esta recubierta con elementos conductivos, se debe demostrar que estos no interfieren con la medición.



Figura 11: Yugo Magnético, ensayo de partículas magnéticas (MT).

2.6.4. Inspección radiográfica (RT)

Por medio de una fuente productora de radiación (Rayos X o gamma) y el principio de transparencia de los materiales para ondas electromagnéticas es posible obtener una imagen latente en una película radiográfica. La imagen radiográfica muestra una proyección plana de la estructura interna del objeto analizado. Permite obtener información sobre la presencia de discontinuidades, cambios de secciones, variaciones locales de densidad o composición que puedan o no constituir defectos. Es una técnica muy precisa, sensible, aplicable para cualquier material, pero requiere tiempo para su desarrollo, aislación del sector de trabajo, materiales de alto costo, acceso por ambos lados del área a evaluar y preparación y experiencia del operador.

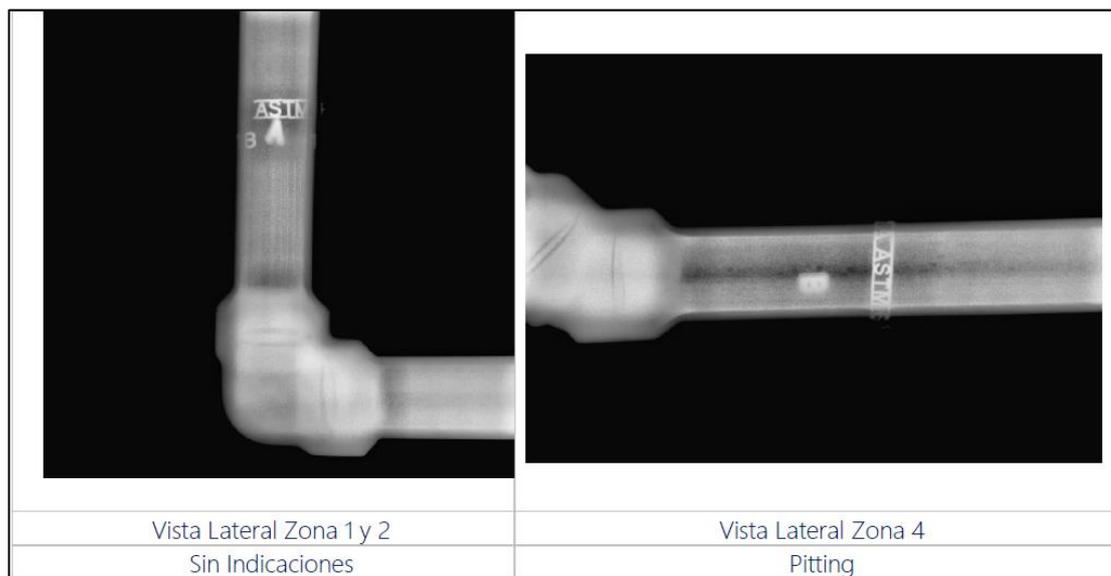


Figura 12: Radiografía digital pulso rayos x. [5]

2.6.5. Ultrasonido (UT)

Técnica que permite medir espesores y detectar discontinuidades superficiales, subsuperficiales e internas en equipos detenidos o apagados fabricados en metales, plásticos, materiales compuestos, fibra de vidrio, cerámicos y vidrio. No puede ser utilizado en piezas con pinturas o materiales sellantes.

Se basa en el estudio de la reflexión de las ondas acústicas. Determina con gran precisión el tiempo que tarda un pulso de sonido generado por un transductor ultrasónico, en atravesar una pieza y regresar al dispositivo (tiempo de vuelo). El transductor contiene un elemento piezoeléctrico el cual es excitado por una corriente eléctrica, la cual está ajustada a una frecuencia determinada, generando ondas ultrasónicas.

Estas son transmitidas al material de prueba, atravesándolo hasta que encuentran la pared posterior u otro límite. Luego, las reflexiones vuelven hacia el transductor, haciendo el proceso inverso de convertir la energía acústica en energía eléctrica. Finalmente, si las ondas encuentran alguna discontinuidad en el camino generan peaks de onda, que indican la naturaleza del defecto.

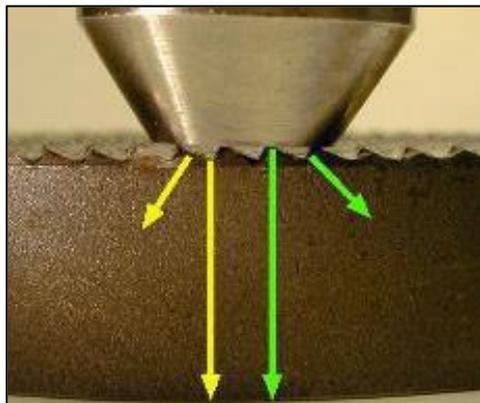


Figura 13: Transductor para ensayo de ultrasonido

Luego de presentadas las técnicas de inspección, es posible establecer una correlación entre los procedimientos de inspección y los mecanismos de deterioro identificados. En la *tabla 9*, se correlacionan varios mecanismos de daño que afectan a equipos estáticos y sus técnicas de inspección asociadas, conforme a lo estipulado en la normativa API 575. [14]

Tabla 9: Correlación Mecanismo de daño vs Técnicas de inspección

Mecanismos de Daño / Falla	Técnicas de Inspección y Descripción
Corrosión Bajo Aislamiento (CUI)	<p>Inspección Visual: Revisión del aislamiento, búsqueda de humedad, y detección de corrosión bajo aislamiento.</p> <p>Ultrasonido: Medición del espesor de la pared.</p> <p>Termografía Infrarroja: Detección de cambios de temperatura o humedad.</p>
Corrosión Bajo Tensión	<p>Inspección Visual: Búsqueda de grietas o fracturas.</p> <p>Pruebas No Destructivas (PND)</p> <p>Examen de Partículas Magnéticas o Líquidos Penetrantes: Detección de fisuras internas y superficiales.</p>
Corrosión Química / Interna	<p>Inspección Visual Interna: Si es accesible, para detectar corrosión, depósitos o daños.</p>

	Ultrasonido: Medición del espesor de las paredes internas.
Corrosión Microbiana (MIC)	<p>Análisis Microbiológicos: Identificación de microorganismos.</p> <p>Inspección Visual: Detección de patrones de corrosión típicos de MIC.</p>
Corrosión Caustica	<p>Inspección Visual: Detección de áreas afectadas.</p> <p>Pruebas de Dureza: Evaluación de cambios en la estructura del material.</p>
Fragilización por Hidrogeno / Factura Frágil	<p>Inspección Visual: Búsqueda de señales de fisuración y detección de fracturas o grietas.</p> <p>Pruebas de Tracción y Dureza / Radiografía: Evaluación de la integridad del material.</p>
Fatiga del Material	Examen de Partículas Magnéticas o Líquidos Penetrantes: Detección de grietas superficiales.
Desgaste por abrasión	<p>Inspección Visual: Evaluación de desgaste superficial.</p> <p>Medición de Espesor por Ultrasonido para determinación de pérdida de material.</p>

Fuente: Elaboración propia, basado en [14]

2.7. Riesgo

En la ingeniería de mantenimiento y confiabilidad, la Inspección Basada en Riesgo (RBI) se fundamenta en principios establecidos por las normativas API 580 y API 581. Este enfoque analítico permite calcular el riesgo como un producto de la probabilidad de fallo (PoF) y las consecuencias de dicho fallo (CoF) en un intervalo de tiempo específico. La PoF se estima a través de un análisis detallado de factores como la historia operativa, condiciones de servicio, y la integridad física del equipo, mientras que la CoF evalúa el impacto potencial en términos de seguridad, medio ambiente y costos operacionales. De esta forma se tiene la *figura 13*:

$$\text{RIESGO} = \text{PROBABILIDAD} \times \text{CONSECUENCIA}$$

Figura 14: Factores de Riesgo, basado en API RP 580

2.7.1. Matriz de riesgo

La matriz de riesgo es una herramienta clave en la metodología RBI, clasifica y visualiza estos riesgos sin depender exclusivamente de cuantificaciones numéricas. Siguiendo las directrices de la API, se organizan las categorías PoF y CoF en ejes perpendiculares, creando una matriz donde el riesgo aumenta progresivamente hacia la esquina superior derecha. El código de colores, que va del verde para riesgos bajos, al rojo para los altos, facilita la interpretación y toma de decisiones.

La personalización de la matriz de riesgo es un paso esencial en la implementación de la RBI, tal como lo sugieren las normas API. Cada instalación debe calibrar su matriz para reflejar su propia estructura de tolerancia al riesgo, asegurando que los límites de riesgo sean coherentes con las políticas de gestión de riesgos de la empresa. Este proceso de calibración garantiza que la estrategia de inspección y mantenimiento esté

alineada con los objetivos de seguridad y eficiencia operativa, optimizando la asignación de recursos y la planificación de actividades de inspección.

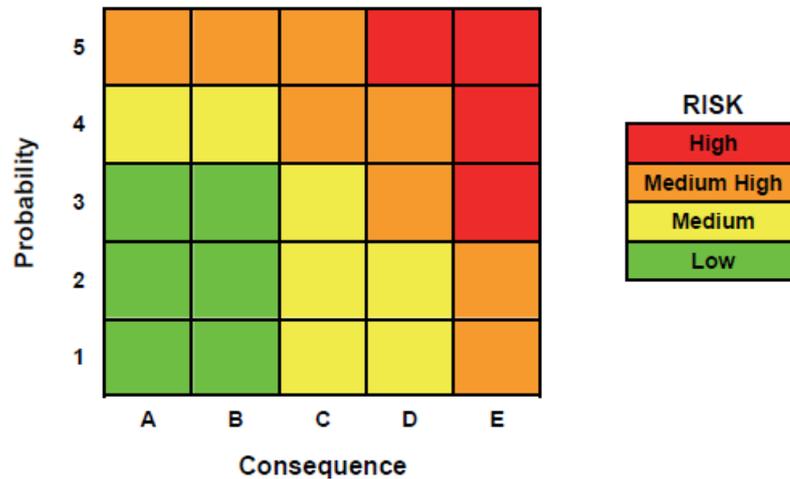


Figura 15: Matriz de Riesgo, API Recommended Practice 581 [4]

2.8. Análisis del riesgo

Como se ha indicado previamente, la evaluación del riesgo se deriva de la multiplicación de la probabilidad de falla por la consecuencia de dicha falla, y el enfoque del análisis puede adoptar formas cualitativas, cuantitativas o una combinación de ambas. La *figura 15* evidencia, en su lado izquierdo, los elementos que inciden en la probabilidad de falla, mientras que en el lado derecho se destacan aquellos que afectan a la consecuencia de la falla. Al integrar todos estos elementos es posible cuantificar el riesgo total. A partir de este cálculo, se pueden identificar los aspectos de mejora y aquellos que presentan deficiencias, permitiendo así reducir el riesgo asociado a la incertidumbre del comportamiento operativo de la planta y

asignar los recursos de una forma más efectiva. [15]



Figura 16: Metodología Integral Para El Diseño Y Optimización De Planes De Inspección- Midopi.[15]

2.8.1. Análisis Cualitativo del Riesgo

El análisis cualitativo es una herramienta esencial para determinar y priorizar los niveles de riesgo en las operaciones de una planta, basándose en la evaluación de la Probabilidad de Fallo (PoF) y la Consecuencia de Fallo (CoF). Dentro del espectro de la Consecuencia de Fallo, se consideran principalmente dos escenarios críticos: [16]

1. Potencial de explosión e incendio debido a la presencia de fluidos inflamables.
2. Riesgo de liberación de sustancias tóxicas, con especial atención en su impacto potencial sobre comunidades cercanas a la instalación.

Este proceso es un paso preliminar crucial para obtener una visión general del riesgo que enfrenta la instalación, lo que es vital para guiar una RBI focalizada y efectiva, hacia los equipos más críticos. El “Apéndice A” de la normativa API 581 provee una “Tabla para el cálculo de la PoF y CoF a través de un análisis cualitativo”. Esta herramienta integra varios factores que inciden en la probabilidad y consecuencia de falla, y su análisis y desarrollo deben ser realizados por un equipo de ingenieros

especializados en RBI. La información obtenida a través de una tabla es clave para asignar valores numéricos a los riesgos y posicionarlos dentro de una matriz de riesgo.

De esta forma los factores que influyen en la valoración de la probabilidad de falla y consecuencia de falla son los siguientes:

2.8.1.1. Evaluación de la Probabilidad de Fallo (PoF)

1. **Factor de Equipo (EF):** Considera el número de equipos dentro de la unidad que están expuestos al riesgo de fallo.
2. **Factor de Daño (DF):** Cuantifica el riesgo relacionado con el mecanismo de daño activo o que podría activarse en las operaciones que se están analizando.
3. **Factor de Inspección (IF):** Evalúa qué tan eficaz es el programa de inspección en detectar, identificar o prever los posibles mecanismos de fallo.
4. **Factor de Condición (CCF):** Mide la efectividad de las actividades de mantenimiento y de las estrategias de gestión en la mitigación de fallos.
5. **Factor de Proceso (PF):** Estima la probabilidad de ocurrencia de operaciones no previstas o desviaciones que puedan derivar en incidentes que comprometan la contención de materiales (por ejemplo, escapes o fugas).
6. **Factor de Diseño Mecánico (MDF):** Valora la actualidad y adecuación de la ingeniería y las prácticas de diseño utilizadas en la construcción de la planta.

La suma de estos factores determina el valor total de la PoF para el equipo en cuestión. Dependiendo del resultado, se asignará una categoría de probabilidad de falla específica. De este modo, la PoF se define mediante la *ecuación 1*:

$$PoF = \sum (EF + DF + IF + CF + PF + MDF) \quad (1)$$

Tabla 10: Categoría PoF por análisis cualitativo

Factor de Probabilidad	
Factores de probabilidad	Categoría de probabilidad
0 - 15	1
16 - 25	2
26 - 35	3
36 - 50	4
51 - 75	5

Fuente: API RP 581 / Appendix A

2.8.1.2. Valoración de la consecuencia de Daño por explosión e incendio

La valoración de las consecuencias de daño por explosión e incendio se aplica exclusivamente a aquellos fluidos con propiedades inflamables. Si el fluido en cuestión del componente es únicamente tóxico, este análisis no procede y se debe avanzar directamente al análisis de consecuencias de falla por toxicidad, contemplado en la *sección 2.8.1.3*. Este criterio se fundamenta en las características de inflamabilidad del fluido, las cuales se determinan conforme a las clasificaciones y estándares definidos por la Asociación Nacional de Protección contra el Fuego (NFPA). Además, se consideran las medidas de seguridad existentes para mitigar el impacto de una eventual fuga. Los detalles de cada factor y su interpretación según la NFPA se encuentran descritos en la *Figura 17*. [17]



Figura 17: Clasificación de riesgos según NFPA [17]

De esta forma, la valoración de las Consecuencias de Fallo (CoF) debido a explosión e incendio se compone de varios factores críticos:

1. **Factor Químico (CF):** Evalúa la propensión de los químicos a autoignición. Se debe basar en el componente químico predominante o más representativo en el flujo. Es necesario realizar análisis individuales en la unidad para diferentes corrientes del proceso.
2. **Factor de Cantidad (QF):** Determina el volumen máximo de material inflamable que podría liberarse durante un incidente.
3. **Factor de Estado (SF):** Mide la facilidad con la que un material puede encenderse al ser liberado en la atmósfera.
4. **Factor de Autocombustión (AF):** Aplica una penalización a aquellos fluidos procesados a temperaturas que superan su punto de autocombustión.
5. **Factor de Presión (PRF):** Representa la probabilidad de que un fluido se escape rápidamente, aumentando el riesgo de efectos inmediatos y severos.
6. **Factor de Crédito (CF):** Considera las medidas de seguridad ingenieril en la unidad que podrían mitigar el impacto de una posible fuga catastrófica.

La combinación de estos factores determina la categoría de las consecuencias de fallo para el equipo, siguiendo la fórmula:

$$CoF = \sum (CF + QF + SF + AF + PRF + CF) \quad (2)$$

La suma de los factores de CoF por Explosión e Incendio definirá la categoría de riesgo correspondiente al equipo.

Tabla 11: Categoría CoF de Daño por Explosión e incendio por análisis cualitativo

Factor de Consecuencia de daño	
Factor	Categoría
0 - 19	A
20 - 34	B
35 - 49	C
50 - 69	D
>70	E

. Fuente: API RP 581 / Appendix A.

2.8.1.3 Valoración de las consecuencias de falla por toxicidad

La valoración de los elementos que inciden en las consecuencias para la salud está relacionada con la existencia y eficacia de los sistemas de detección de fugas, así como de los sistemas de aislamiento y de mitigación implementados. La *figura 18* ilustra el procedimiento por el cual se produce la liberación del fluido confinado.

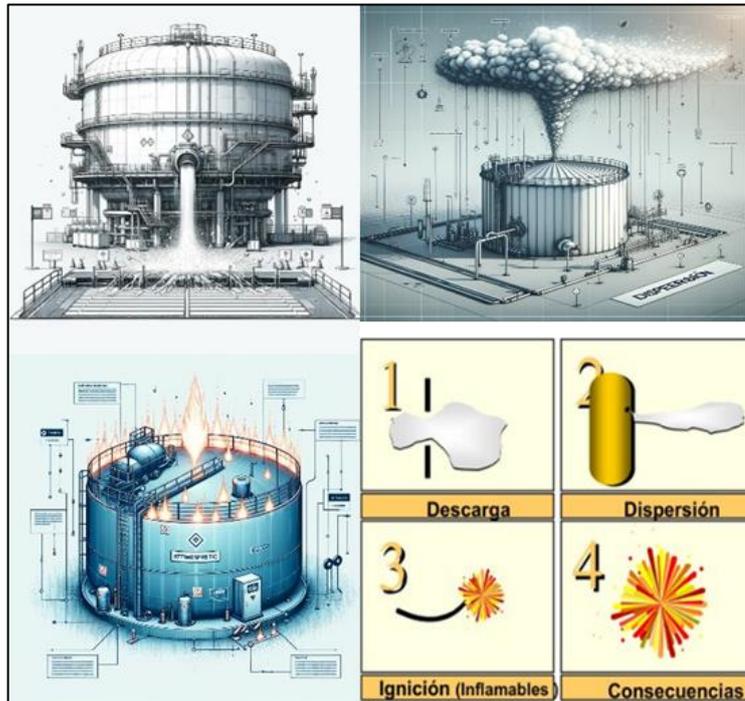


Figura 18: Proceso de liberación de fluido

La evaluación de las consecuencias de una fuga tóxica se lleva a cabo considerando varios factores clave:

1. **Factor de Cantidad Tóxica (TQF):** Calcula el riesgo en función del volumen de material liberado y su nivel de toxicidad.
2. **Factor de Dispersión (DIF):** Evalúa la capacidad de dispersión del material tóxico bajo condiciones normales de operación.
3. **Factor de Crédito (CRF):** Considera las medidas de seguridad implementadas que pueden mitigar las consecuencias de una liberación tóxica, como la detección temprana, el aislamiento efectivo y los sistemas de mitigación.
4. **Factor de Población (PPF):** Estima el número de personas que podrían verse afectadas por una exposición a un evento tóxico.

El valor final Cof por toxicidad se encuentra dado por la sumatoria de los factores nombrados, según la *ecuación 3*:

$$CoF (Toxicidad) = \sum (TQF + DIF + CRF + PPF) \quad (3)$$

La sumatoria de los factores de CoF por Toxicidad indicarán la categoría a la cual corresponde el equipo, según la *Tabla 12*:

Tabla 12: Categoría CoF de Daño por Toxicidad por análisis cualitativo.

Factor de Consecuencia de Toxicidad	
Factor	Categoría
<10	A
10 - 19	B
20 - 29	C
30 - 39	D
>40	E

Fuente: API RP 581 / Appendix A.

2.8.2. Análisis Cuantitativo y Semicuantitativo del Riesgo

El análisis cuantitativo de riesgo también se basa en la evaluación de la probabilidad y consecuencia de fallos, pero con un enfoque más detallado. Es importante mencionar que en este informe se enfoca exclusivamente en el análisis cualitativo de la

metodología; por tanto, se abordará el procedimiento cuantitativo únicamente de forma superficial.

Dicho análisis se concentra en la valoración de factores que alteran la frecuencia de falla y las áreas que podrían verse afectadas por la liberación de productos al medio ambiente debido a una falla en la contención. Inicialmente, se calcula un factor representativo de la probabilidad de fallo, seguido de una valoración de un factor para las consecuencias. Estos elementos se integran posteriormente en una matriz de riesgo para determinar el nivel de riesgo asociado a cada componente.

2.8.2.1 Probabilidad de falla en Análisis Cuantitativo

Es una combinación de factores fundamentales, representados en la *ecuación 4*:

$$Pf(t) = ggf * Df(t) * FMS \quad (4)$$

Donde:

Pf(t): Probabilidad de falla (eventos/año).

ggf: Frecuencia de falla genérica (eventos/año).

Df(t): Factor de Daño.

FMS: Factor del sistema gerencial.

Estos factores cumplen cuatro roles específicos:

- **Identificación de Mecanismos de Daño:** Trazar los mecanismos de deterioro que pueden presentarse bajo condiciones operativas normales y extremas.
- **Determinación de la Tasa de Daño:** Establecer la frecuencia a la que se están produciendo daños bajo las condiciones actuales de operación del equipo.

- **Evaluación de la Eficacia del Programa de Inspección:** Medir el éxito del programa en términos de su habilidad para identificar y detectar estos mecanismos de deterioro.
- **Cálculo del Factor de Modificación de la Frecuencia Genérica:** Determinar cómo las condiciones operativas específicas afectan la probabilidad de falla del equipo.

2.8.2.1.1. Frecuencia genérica de falla (gff)

La base de datos para las frecuencias genéricas de fallo se fundamenta en la recopilación de registros históricos de fallos en una variedad de componentes (equipos y circuitos de tuberías de distintos diámetros) utilizados en varias instalaciones de la industria petrolera y gasífera. Esta compilación se ha desarrollado considerando cuatro tamaños distintos de orificios en caso de eventos de fuga, que son ¼”, 1”, 4” y ruptura total. Un recurso ampliamente utilizado para estas frecuencias genéricas de fallo es la *Tabla 13* “Suggested Component Generic Failure Frequencies” del API RP 581. No obstante, cuando se cuenta con un historial de fallos suficiente para un componente específico, es posible calcular la frecuencia real de fallo de este.

Tabla 13: Frecuencia genérica de fallas de componentes

Equipment Type	Component Type	gff as a Function of Hole Size (failures/yr)				gff_{total} (failures/yr)
		Small	Medium	Large	Rupture	
Compressor	COMPC	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	0	3.00E-05
Compressor	COMPR	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
Heat Exchanger	HEXSS, HEXTS,	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
Pipe	PIPE-1, PIPE-2	2.80E-05	0	0	2.60E-06	3.06E-05
Pipe	PIPE-4, PIPE-6	8.00E-06	2.00E-05	0	2.60E-06	3.06E-05
Pipe	PIPE-8, PIPE-10, PIPE-12, PIPE-16, PIPEGT16	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
Pump	PUMP2S, PUMPR, PUMP1S	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
Tank650	TANKBOTTOM	7.20E-04	0	0	2.00E-06	7.20E-04
Tank650	COURSE-1-10	7.00E-05	2.50E-05	5.00E-06	1.00E-07	1.00E-04
Vessel/FinFan	KODRUM, COLBTM, FINFAN, FILTER, DRUM, REACTOR, COLTOP, COLMID	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05

Note:
See references [1] through [8] for discussion of failure frequencies for equipment

Fuente: API 581, Tabla 3.1 [4]

2.8.2.1.2. Factor de daño (Df)

El propósito fundamental del Factor de Daño (DF) es realizar una evaluación estadística del nivel de daño potencial, considerando tanto el tiempo de servicio del equipo como la efectividad de las actividades de inspección realizadas. Para calcular el DF, se aplican métodos sistemáticos que evalúan el impacto de mecanismos específicos de deterioro bajo condiciones operativas normales y extremas. Estos métodos determinan cómo dichos mecanismos afectan la probabilidad de fallo de cada componente, cuantifican la eficiencia del programa de inspección implementado y calculan cualquier ajuste necesario en la frecuencia genérica de fallo.

Algunos mecanismos de deterioro presentan un incremento considerable en la frecuencia de fallo bajo condiciones extremas, como variaciones significativas de temperatura o cambios en la concentración de contaminantes en el fluido procesado. Estos cambios suelen ocurrir durante operaciones de arranque o parada del proceso.

Para analizar el impacto del daño acumulado y la influencia de las inspecciones en la probabilidad de fallo, se deben realizar los siguientes pasos:

- Determinar la rapidez y gravedad del daño.
- Evaluar la confianza en la severidad del daño identificado.
- Medir la efectividad de los programas de inspección.
- Estimar cómo la inspección mejora la identificación del daño.
- Calcular la probabilidad de que un nivel de daño específico supere la tolerancia del equipo y conduzca a un fallo.
- Determinar los factores de daño individuales.
- Calcular el factor de daño total para todos los mecanismos identificados.

La normativa API RP 581 destaca varios factores de daño en función de los mecanismos de deterioro como:

- Adelgazamiento por corrosión/erosión (D_{thin})
- Agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos (D_{scc})
- Daño externo (D_{extd})
- Ataque por hidrógeno a alta temperatura (D_{htha})
- Fractura frágil (D_{brit})
- Fatiga mecánica en tuberías (D_{mfat})

Cada uno de estos factores se evalúa mediante un proceso de toma de decisiones detallado, utilizando información de proceso y mantenimiento para identificar el tipo de mecanismo de deterioro en cada equipo, según se detalla en la norma API RP 571.

2.8.2.1.3. Factor del sistema gerencial (Fms)

Para establecer el factor del sistema gerencial en empresas que aún no lo han definido, se sigue el procedimiento del Anexo 2.A. del API RP 581. Este método evalúa 13 aspectos clave:

1. **Liderazgo y Administración:** Evalúa cómo la dirección y la gestión impactan en la seguridad de los procesos.
2. **Información sobre Seguridad de Procesos:** Analiza la calidad y accesibilidad de la información relacionada con la seguridad.
3. **Análisis de Peligros de Proceso:** Estudia la efectividad en la identificación y manejo de peligros.
4. **Gestión del Cambio:** Evalúa los procedimientos para gestionar cambios en los procesos.
5. **Procedimientos Operacionales:** Mide la adecuación y actualización de los procedimientos operativos.
6. **Prácticas de Trabajo Seguro:** Considera cómo se promueven y aplican prácticas seguras de trabajo.
7. **Capacitación o Entrenamiento:** Evalúa la calidad y efectividad de los programas de formación.
8. **Integridad Mecánica:** Analiza la eficacia de los programas de mantenimiento y la condición de los equipos.
9. **Revisión de Seguridad Previa al Arranque:** Considera los procedimientos de seguridad antes de iniciar operaciones.
10. **Respuesta a Emergencias:** Evalúa la preparación y respuesta ante situaciones de emergencia.
11. **Investigación de Incidentes:** Mide la efectividad en la investigación y aprendizaje de incidentes.
12. **Contratistas:** Examina cómo se gestionan y controlan los contratistas en relación con la seguridad y operación.

13. Evaluación del Sistema de Gerencia o Auditorías: Considera la frecuencia y efectividad de las auditorías internas.

El factor del sistema de manejo se calcula evaluando como el sistema de gestión y las operaciones impactan en el riesgo de la planta. La evaluación debe ser realizada por la gerencia, ingenieros y personal encargado del monitoreo y operación de los sistemas y equipos. Cada aspecto contiene preguntas con un puntaje asignado. Tras responderlas, se suman los puntajes para obtener un “*pscore*”, el cual se utiliza en la *ecuación 6* para determinar el factor del sistema de manejo.

$$\mathbf{FMS = 10 (0.02 * pscore + 1)} \quad \mathbf{(5)}$$

Donde *pscore* (puntaje de evaluación de los sistemas de gestión expresado en porcentaje):

$$pscore = \frac{score}{1000} * 100 \text{ (unidades en \%)} \quad \mathbf{(6)}$$

El valor de *pscore* corresponderá al puntaje obtenido según cada aspecto, en la *tabla 14*:

Tabla 14: Evaluación del sistema gerencial.

Table	Title	Questions	Points
2.A.1	Leadership and Administration	6	70
2.A.2	Process Safety Information	10	80
2.A.3	Process Hazard Analysis	9	100
2.A.4	Management of Change	6	80
2.A.5	Operating Procedures	7	80
2.A.6	Safe Work Practices	7	85
2.A.7	Training	8	100
2.A.8	Mechanical Integrity	20	120
2.A.9	Pre-Startup Safety Review	5	60
2.A.10	Emergency Response	6	65
2.A.11	Incident Investigation	9	75
2.A.12	Contractors	5	45
2.A.13	Audits	4	40
Total		101	1000
Note: Tables 2.A.1 through 2.A.13 are located in Annex 2.A.			

Fuente: API RP 581, Tabla 4.4

2.8.2.2. Determinación de las consecuencias de falla

En el análisis de la matriz de riesgo, la evaluación de las consecuencias es un aspecto crucial. Estas pueden calcularse teniendo en cuenta el área afectada (expresada en pies cuadrados por año) o el impacto financiero (en dólares por año), siguiendo las directrices de la Norma API RP 581/parte 3. Los factores por considerar en este cálculo incluyen:

- La naturaleza de la falla y la cantidad de fluido liberado.
- La velocidad del fluido liberado, que depende del tamaño del orificio de fuga (¼”, 1”, 4” y ruptura total).
- Características del fluido como la viscosidad, densidad y la presión de operación.

- Las consecuencias para las personas, basadas en el número de posibles víctimas.
- Los impactos ambientales, evaluados en términos de los costos asociados a posibles derrames, incluyendo saneamiento, recolección de residuos, multas y otros gastos relacionados.
- Las consecuencias derivadas de la pérdida de producción.
- Este enfoque integral permite una valoración completa de las consecuencias asociadas a distintos escenarios de riesgo en la planta.

El procedimiento para calcular las consecuencias en la matriz de riesgo implica una evaluación de distintos factores según lo establece la Norma API RP 581/parte 3:

- Cálculo de Consecuencias Económicas por Fuego, Explosión y Toxicidad:** Incluye el análisis del área afectada, los costos de los equipos y su reparación en dicha área. Para daños personales, se considera la densidad poblacional afectada.
- Cálculo de Consecuencias Económicas por Pérdidas de Producción:** Se estima usando la tabla 5.17 “Estimated Equipment Outage” de la Norma API RP 581/parte 3.
- Cálculo de Consecuencias Ambientales:** Evalúa los efectos de posibles derrames al mar, basado en el volumen derramado y su costo.
- Nivel de Consecuencia de Falla:** Se divide en dos niveles, según el enfoque, el que puede ser simplificado o detallado, el cual se especifica en la *tabla 15*:

Tabla 15: Niveles de consecuencia de falla

Nivel 1	
<p>Utiliza un enfoque simplificado con tablas y gráficos para calcular las consecuencias de emisiones sin necesidad de modelado especializado. Se basa en supuestos de simplificación como la fase del fluido, propiedades promedio del fluido, y probabilidades de ignición predeterminadas.</p>	<ol style="list-style-type: none">1. La fase del fluido dada la emisión puede ser solamente líquido o gas, dependiendo de la fase de almacenamiento y la fase esperada a ocurrir una vez liberada a la atmósfera, en general, no se hace consideración de los efectos de enfriamiento del líquido que flashea, lluvia, arrastre por chorro líquido o dos fases.2. Las propiedades de fluido para los fluidos representativos que contengan mezclas están basadas en valores promedio (p. ej. densidad, calor específico)3. Las probabilidades de ignición, así como las probabilidades de otros eventos de emisión (incendio charco, chorro de fuego, etc.) se han predeterminado para cada uno de los fluidos representativos como una función de la temperatura, y el tipo de emisión. Estas probabilidades son constantes y totalmente independientes de la tasa de emisión

Nivel 2	
<p>Requiere cálculos más detallados y se usa cuando las suposiciones del Nivel 1 no son válidas. Incluye escenarios como fluidos no representados en el Nivel 1, condiciones cercanas al punto crítico, efectos de emisiones de dos fases y efectos meteorológicos específicos del sitio.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. El fluido específico no se representa adecuadamente dentro de la lista de grupos de fluidos de referencia provistos en el Análisis de Consecuencias de nivel 1, incluyendo casos donde el fluido es una mezcla hirviente de amplio rango o donde las consecuencias toxicas del fluido no son representadas adecuadamente por ninguno de los fluidos de referencia. 2. El fluido almacenado se encuentra cerca de su punto crítico, en cuyo caso, la suposición de gas ideal para las ecuaciones de emisiones de vapor no son válidas. 3. Los efectos de las emisiones de dos fases, incluyendo los arrastres de chorros líquidos, así como las lluvias necesitan ser incluidas en la evaluación. 4. Los efectos de leves se incluirán en la evaluación (no incluida en el análisis de nivel 1) 5. Los efectos de explosiones presurizadas no inflamables, tal como sea posible cuando gases presurizados

	<p>no inflamables (p. ej. Aire o nitrógeno) son liberados durante la ruptura de un recipiente, deberán ser incluidos en la evaluación (no incluidos en el análisis de nivel 1).</p> <p>6. Las suposiciones meteorológicas (véase Anexo 3.A de API RP 581) usadas en los cálculos de dispersión que forman la base de las tablas de revisión del análisis de consecuencias de nivel 1 no representan los datos del sitio.</p>
--	--

Fuente: Elaboración propia, basado en API RP 581 Part 3. [18]

2.8.3. Analisis de riesgo y jerarquización

Tras implementar la metodología de análisis, se posiciona cada equipo dentro de la matriz de riesgo con su respectivo par de valores. A continuación, se lleva a cabo una evaluación global de los datos recolectados, la cual implica distribuir todos los equipos y componentes en la matriz para obtener una clasificación clara y definida del nivel de riesgo en el que se hallan actualmente. *La figura 19* ejemplifica cómo se presenta esta jerarquización en la evaluación del riesgo cualitativo.

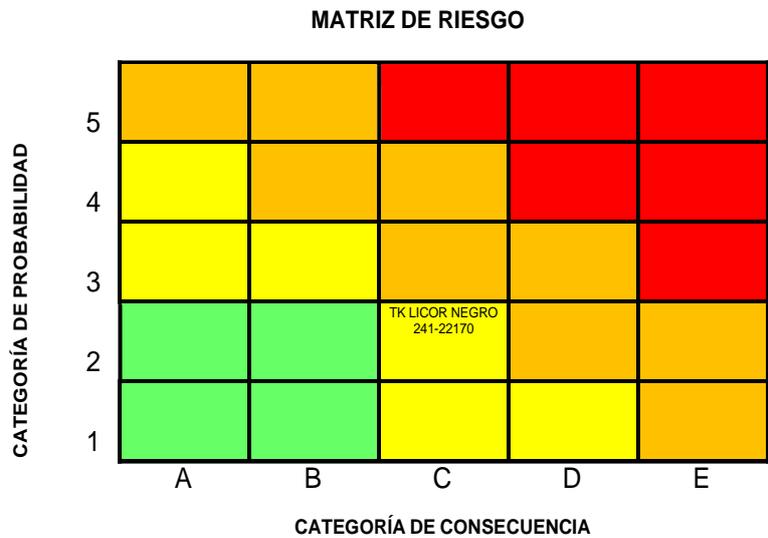


Figura 19: Ejemplo Jerarquización de TK Licor Negro 241-22170.

Una vez identificados los riesgos y costos asociados a cada equipo, es posible determinar aquellos que generan la mayor carga económica anual en función del riesgo que representan. Este análisis facilita la realización de comparaciones con el principio de Pareto, comúnmente resumido en que "el 80% de los costos proviene del 20% de los equipos". Este enfoque permite identificar los equipos que requieren una inversión prioritaria en recursos para minimizar los riesgos de manera efectiva. La *figura 20* ilustra esta dinámica en un conjunto de equipos, mostrando cómo un pequeño grupo de estos acarrea la mayor parte del riesgo total.

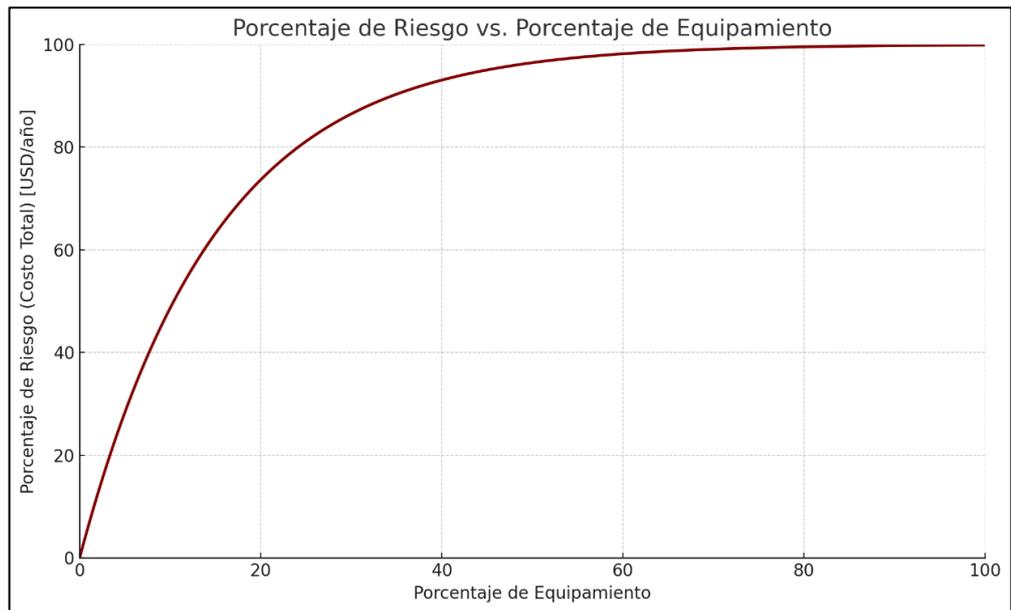


Figura 20: *Porcentaje de equipos vs Porcentaje de contribución al riesgo*, adaptado de [3]

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1. Introducción a la Metodología RBI

La metodología Inspección Basada en Riesgo está fundamentada en las normativas API RP-580 y 581, permitiendo caracterizar el riesgo asociado a los componentes estáticos de un sistema de producción sometidos a corrosión, con base en el análisis del comportamiento histórico de fallas, modos de degradación o deterioro, características de diseño, condiciones de operación, mantenimiento, inspección y políticas gerenciales tomando en cuenta al mismo tiempo la calidad y efectividad de la inspección, así como las consecuencias asociadas a las potenciales fallas. [19]

Una vez delimitado los sistemas, equipos o componentes a los cuales se les aplicara por primera vez la metodología de inspección basada en riesgo (RBI). Se continua de la siguiente manera:

- Recolección de datos e información.
 - Validación de información
 - Sistematización y valoración de los mecanismos de deterioro
- Análisis del riesgo.
 - Evaluación de la probabilidad de falla (veces/año)
 - Evaluación de consecuencias.
 - Evaluación del riesgo (mediante matriz de riesgos).
- Clasificación de los riesgos.
- Revisión del plan de inspección.
- Reevaluación del plan de inspección.

Una vez seleccionados los sistemas, equipos y/o circuitos de tubería a los cuales se le aplicará la metodología RBI API, se deben comenzar a seguir los pasos del flujo de trabajo de la *figura 21*, a partir de la recolección de información:

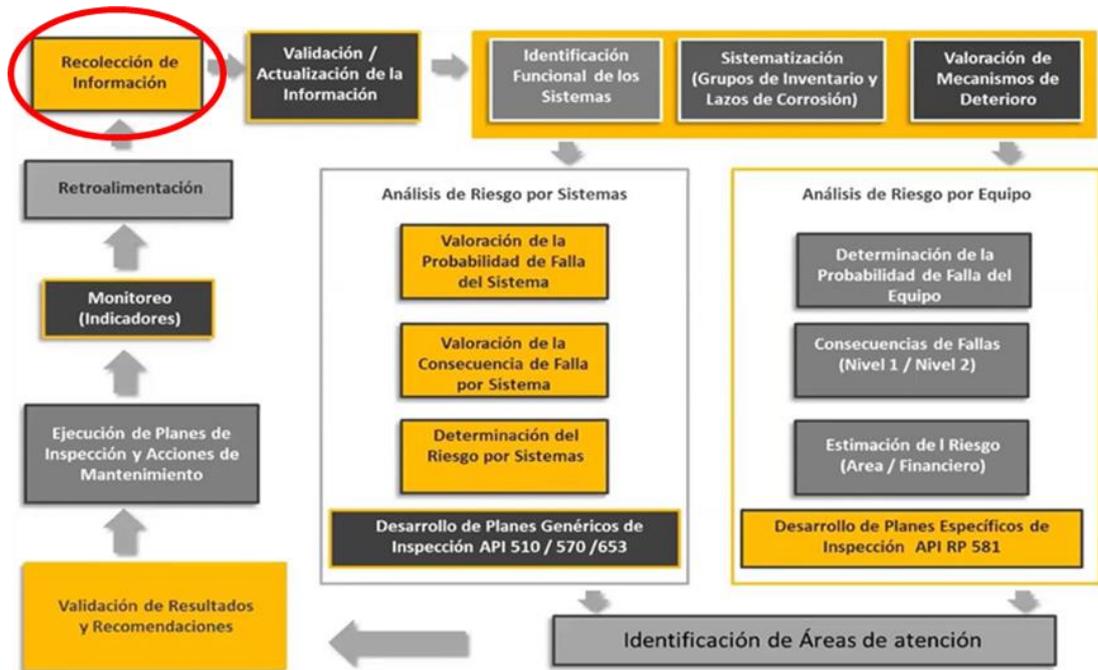


Figura 21: Aplicación de la metodología RBI, para la generación de planes óptimos.
[15]

3.2. Recolección de datos e información

El primer paso es obtener, comprender y evaluar los datos técnicos e información necesaria para establecer la base del análisis para desarrollar el mapa de riesgos y el plan de inspección. En tal sentido, se toma en consideración la información relativa al diseño, fabricación, instalación, operación y mantenimiento de los equipos y componentes de la instalación, así como la información disponible de los **registros de inspección**.

Entre las fuentes de información más importantes para el desarrollo de este estudio, se encuentran:

- Diagramas de flujo de proceso (DFP's o PFD's).
- Diagramas de tubería e instrumentación (DTI's o P&ID's).
- Planos generales de la plataforma (PLG).

- Planos isométricos.
- Historia y registro de inspecciones y mantenimientos realizados.
- Caracterización de los fluidos de los sistemas
 - Hojas de especificación de equipos, hojas de seguridad de sustancias de proceso
 - Estudios previos de riesgo y cualquier otra información técnica que contribuya al desarrollo del estudio.

3.2.1. Validación de la información

Se debe asegurar que la información recopilada este actualizada y validada por personas debidamente capacitadas en las áreas respectivas. La necesidad de garantizar la información es múltiple, dado que pueden existir documentos, diagramas y datos no actualizados que no reflejen la realidad de la instalación, la falta de trazabilidad de las inspecciones, errores de los inspectores y otras fuentes que pueden afectar negativamente la exactitud de los resultados.

Por lo cual se emplean esfuerzos para reducir las posibles fuentes de error, realizando:

- Confrontación física de los diagramas e isométricos.
- Reuniones de validación de información con los expertos de las áreas relacionadas.
- Comparación entre las magnitudes de las velocidades de corrosión registradas con base a las inspecciones y las registradas en bibliografía o instalaciones similares.

La actualización de la información se limita a considerar todas las líneas y equipos existentes en las instalaciones y descartar aquellas que han sido retirados de servicio, con el fin de generar los planes de inspección y acciones de mantenimiento acordes a la realidad operacional, y evitando generar planes y acciones no necesarias, así como el almacenamiento de datos poco confiables.

3.2.2. Identificación funcional de los sistemas, sistematización y valoración de los mecanismos de deterioro

En este paso se debe separar la planta en funciones, es decir, separarla por las áreas de funcionamiento y los equipos a los cuales se les aplicara la metodología. Por ejemplo en celulosa Arauco, las áreas de funcionamiento son: madera, digestor, lavado y blanqueo, etc.

Para la valoración de los mecanismos de deterioro, se utiliza la norma API RP 571 denominada “Mecanismos de daño que afectan los equipos estáticos en la industria de la refinería y petróleo”. En este documento, se presentan los mecanismos de daño activos o potencialmente activos, especificando el concepto de cuál es el problema que se está presentando, cuáles son los materiales susceptibles y la técnica de inspección y monitoreo que puede ser aplicada.

3.3. Análisis del riesgo

En la implementación de la metodología RBI API, se distinguen dos enfoques de análisis de riesgo: cualitativo y cuantitativo. La principal diferencia entre ambos radica en el grado de detalle y la naturaleza de los datos utilizados. El análisis cualitativo, también conocido como análisis de riesgo por sistemas, se centra en evaluar y comparar los riesgos de manera relativa entre diferentes equipos, sin asociar estos riesgos a valores monetarios. Por otro lado, el análisis cuantitativo, o análisis de riesgo por equipo, profundiza al calcular el nivel absoluto de riesgo al que están expuestos los equipos o componentes, vinculando estos riesgos con unidades monetarias.

Para este estudio, se optará por presentar únicamente los resultados derivados de una evaluación cualitativa del riesgo. Este enfoque permitirá obtener una visión general del nivel de riesgo en los equipos, de acuerdo con la metodología RBI API. Esta evaluación inicial es fundamental, ya que facilita la identificación de los equipos más críticos. Posteriormente, y en función de los resultados obtenidos, se podrá considerar la realización de una evaluación cuantitativa más detallada.

3.3.1. Analisis de riesgo Cualitativo (por sistemas)

El objetivo principal de este estudio es llevar a cabo una evaluación general del riesgo, centrándose en aspectos como la probabilidad de fallo, las consecuencias de daños debidos a explosiones e incendios, y las implicaciones de la fuga de fluidos tóxicos. Este enfoque analítico es clave para determinar que equipos requieren una atención más intensiva. Al evaluar tanto la probabilidad de fallo (PoF) como las consecuencias de fallo (CoF), se califican los factores críticos que influyen en estos aspectos, los cuales, siguiendo la metodología API, se categorizan en una matriz. Esta clasificación es esencial para estimar el riesgo asociado a cada sistema.

Para la realización de un análisis cualitativo, se aplica el apéndice A del API RP 581 "*Workbook for qualitative risk-based inspection analysis*", que se incluye en Anexo 2 de este documento. Este tipo de análisis proporciona una comprensión integral del riesgo en todos los equipos, permitiendo así priorizar los riesgos identificados sin necesidad de incurrir en los extensos recursos que demanda un análisis cuantitativo. Este último requiere de un elevado grado de precisión, y un volumen considerable de información de los equipos y fluidos involucrados.

Es importante destacar que el análisis de riesgo cualitativo no contempla la evaluación económica de las consecuencias del riesgo. Además, los planes de inspección derivados de un análisis cualitativo generalmente se alinean con los planes estándar de la API, como son el API 510 para recipientes a presión, API 570 para tuberías y API 653 para tanques atmosféricos, dependiendo del tipo de equipo involucrado en la metodología.

3.4. Clasificación de los riesgos

Este paso implica categorizar los riesgos identificados según su severidad o prioridad. Se basa en los resultados del análisis de riesgo y la evaluación de la probabilidad y consecuencias de falla. La clasificación permite priorizar las acciones y recursos,

enfocándose primero en aquellos riesgos que presentan mayor potencial de impacto negativo o que tienen una mayor probabilidad de ocurrencia.

Revisión del plan de inspección

Una vez clasificados los riesgos, se revisa el plan de inspección actual para asegurar que esté alineado con los hallazgos del análisis de riesgo. Esta revisión busca optimizar las estrategias de inspección, ajustándolas a los niveles de riesgo identificados. El objetivo es garantizar que las técnicas de inspección, la frecuencia y el alcance sean los más adecuados para los riesgos clasificados en cada equipo o componente.

3.5. Ejecución de planes de inspección y Acciones de mantenimiento

En este punto es donde la gerencia decide si realizar la ejecución de los planes de inspección y acciones de mantenimiento que se han detectado.

Esto definitivamente afectará los indicadores de gestión y confiabilidad de la planta, y lo más importante es destacar que esto es un proceso iterativo de mejoramiento continuo, donde a medida que se van desarrollando los planes inspección se obtiene una retroalimentación de la base de datos, lo que permite cada vez tener un mayor control del sistema permitiendo tomar mejores decisiones en cuanto a lo que es la valoración de la integridad de los activos y tomar decisiones fundamentales respecto a la extensión o reducción de los intervalos de inspección según el tipo de equipo .

CAPÍTULO 4. ESTUDIO CASO: PLANTA CELULOSA ARAUCO

Celulosa Arauco y Constitución S.A, remonta sus orígenes en 1967, año donde el cual CORFO, en su búsqueda por desarrollar los recursos forestales del país, aumentar la empleabilidad en zonas aisladas y mejorar la calidad de recursos de suelo en terrenos agrícolas degradados, crea Celulosa Arauco S.A y posteriormente, un año después, Celulosa Constitución S.A. Luego de un periodo de 10 años, y tras ser privatizadas ambas compañías, se produce la adquisición de estas por la actual COPEC S.A, accionista mayoritario de la fusión de organizaciones.

Ahora para comenzar con el caso de estudio en cuestión, el proceso de Inspección Basada en Riesgo (RBI) se establece con el objetivo de jerarquizar los equipos del área de fibra basados en su riesgo inherente. Este análisis se detiene antes de llegar a la etapa de modificación de los planes de inspección, marcando el alcance y los límites de la tesis. La prioridad se centra en clasificar los equipos en función de la probabilidad y consecuencia de falla, para ofrecer una visión clara que apoye la toma de decisiones en la gestión de mantenimiento predictivo.

4.1. Área de Fibra: Descripción y Funciones

La industria de la celulosa representa un sector vital en la producción de papel y otros materiales basados en fibra. En el corazón de este proceso se encuentra el área de fibra, una división especializada que juega un papel crucial en la transformación de la madera en pulpa de celulosa, el componente esencial para la fabricación de una amplia gama de productos de papel. Esta área abarca una serie de procesos técnicos y químicos, comenzando con la selección y preparación de la madera, que es procesada en astillas antes de su tratamiento químico.

Preparación de la Madera: La madera es el principal insumo en la producción de celulosa. El área de fibra es responsable de seleccionar, preparar y procesar la madera. Esto incluye actividades como el descortezado, el picado y la clasificación de la madera en chips o astillas de tamaño adecuado para su procesamiento posterior.

Cocimiento o Digestión: En esta etapa, los chips de madera se tratan con productos químicos y calor para separar la lignina (un adhesivo natural que mantiene unidas las fibras de celulosa en la madera) de las fibras de celulosa. El resultado es una pulpa de celulosa que se puede usar para fabricar papel.

Blanqueo: La pulpa de celulosa suele tener un color marrón natural debido a la lignina residual y otros compuestos. El área de fibra es responsable del proceso de blanqueo, donde se utilizan diferentes químicos para eliminar estos colores y obtener una pulpa más blanca y pura.

Lavado y Depuración: Después del cocimiento y el blanqueo, es importante lavar la pulpa para eliminar los químicos residuales y las impurezas. También se realiza una depuración para eliminar las partículas de madera que no se disolvieron durante el cocimiento.

Refinado: En esta etapa, la pulpa se pasa a través de una serie de procesos mecánicos para mejorar sus propiedades físicas, como la resistencia y la flexibilidad, que son importantes para la producción de papel de alta calidad.

4.2. Equipos por Evaluar

Para el desarrollo de este trabajo fueron evaluados una cantidad de 11 equipos estáticos distribuidos en el área de fibra de la empresa Celulosa Arauco, el grupo de equipos está compuesto de Tanques atmosféricos (designados con su “TAG” correspondiente). En la *tabla 16* se puede observar el detalle de los equipos según el material y fluido que contienen.

Tabla 16: Lista de equipos evaluados

Área	TAG	Descripción
Digestor	241-22170	TK LICOR NEGRO
Digestor	241-22175	TK REACTOR OXIDACIÓN 1
Digestor	241-22186	TK REACTOR OXIDACIÓN 2
Digestor	241-23036	TK NIVEL
Digestor	241-23059	TK FLASH 1

Digestor	241-23060	TK FLASH 2
Digestor	241-23095	TK FLASH 3
Lavado	246-22013	TK FILTRADO 1 LAVADOR DIFUSOR
Lavado	246-22014	TK FILTRADO 2 LAVADOR DIFUSOR
Lavado	246-22068	TK FILTRADO DECKER REPULPADOR
Lavado	246-22118	TK FILTRO PRENSADO 1

Fuente: Elaboración propia, basado en planes de inspección área mantención predictiva.

Luego de seleccionados los equipos a los cuales se les aplicará la metodología RBI, lo que supone el inicio del caso de estudio, se sigue con el proceso de recopilar la información necesaria respecto a las características de los equipos, fluidos y áreas donde se encuentran dentro de la empresa. En la *figura 22*, se puede observar el esquema general utilizado para este caso de estudio.

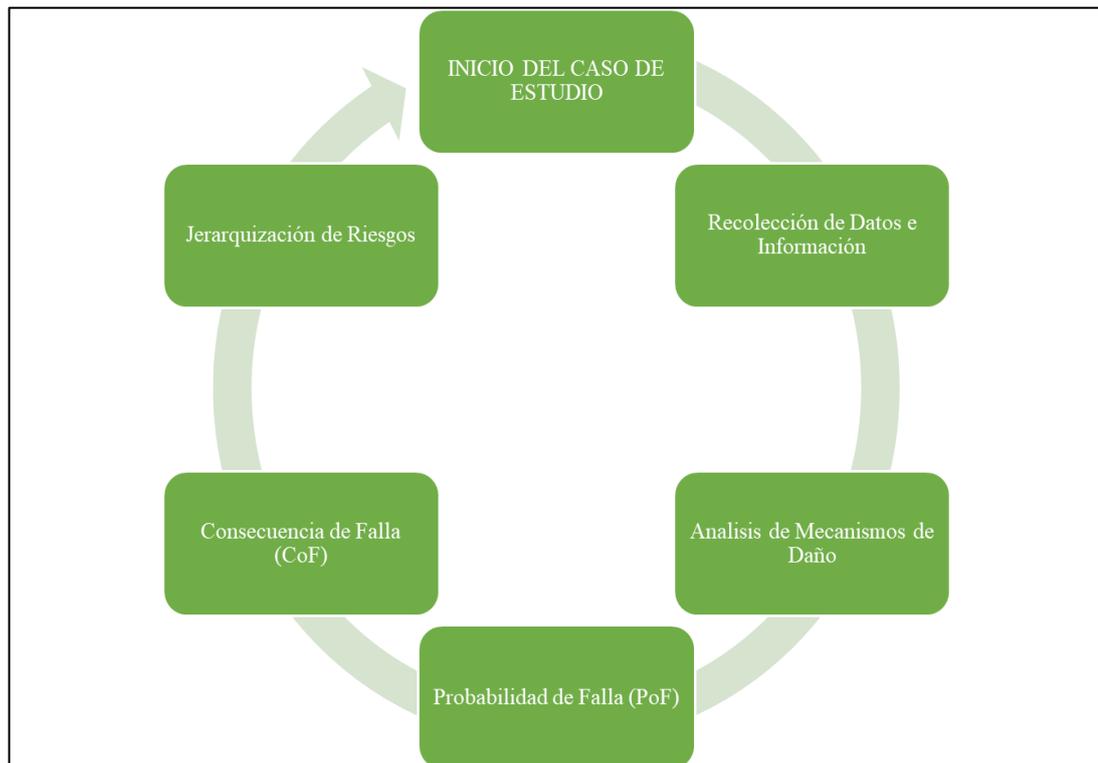


Figura 22: Implementación de la RBI en análisis cualitativo, *Elaboración propia basado en [3]*

4.3. Proceso de implementación RBI

4.3.1. Recolección de información

El paso siguiente al haber establecido los equipos que entrarán en el análisis es la recolección de información y posteriormente la validación de que la información obtenida es correcta.

En el primer paso se utilizaron los códigos de los equipos para obtener la información recolectada de diferentes informes del área predictiva de Arauco. Se recopiló la información necesaria como propiedades del equipo, informes de inspección, características de los fluidos y manuales interactivos entre otros.

Para obtener las propiedades de los fluidos presentes en las diferentes áreas, se elaboró un listado previo con todos los fluidos pertenecientes a los equipos estáticos. Con lo que se pudo confeccionar una tabla donde se indican las propiedades de estos y las indicaciones de qué hacer en caso de eventos indeseados. En la *tabla 17* se pueden observar las características generales de los fluidos presentes en el análisis, donde los factores de Salud, Inflamabilidad y Reactividad y el valor de “NU” son los señalados por la norma NFPA 704.

Tabla 17: Características de los fluidos.

Fluido	NU	Salud	Inflamabilidad	Reactividad	T ° EB (°C)
Licor Blanco	1719	3	0	1	97
Licor Negro	1719	3	0	1	97
Ácido Sulfúrico	1830	3	0	2	335
Peróxido de Hidrógen o	2015	2	0	3	107

Trementina	1299	1	3	0	150
Soda Cáustica	1824	3	0	1	145
Biocida	1017	3	1	0	849
Tall Oil	2735	1	1	0	207
Petróleo Diesel	1202	1	2	0	177
Fuel Oil N°6	1268	1	2	0	180
Hipoclorito de sodio	1791	3	0	1	110

Fuente: Elaboración propia, basado en características de los fluidos Celulosa Arauco.

Digestor - TK LICOR NEGRO (241-22170): Este equipo maneja "Licor Negro", un subproducto del proceso de cocción de la madera. El licor negro es una mezcla de agua, lignina, hemicelulosa, y productos químicos residuales.

Digestor - TK REACTOR OXIDACIÓN 1 (241-22175) y TK REACTOR OXIDACIÓN 2 (241-22186): Estos reactores de oxidación manejan licor negro que se somete a un proceso de oxidación para reducir compuestos sulfurosos.

Digestor - TK NIVEL (241-23036): Este estanque de nivel está involucrado en el control y monitoreo del "Licor Blanco", una solución alcalina rica en químicos como hidróxido de sodio y sulfuro de sodio que se emplea en el proceso de cocción de la madera en la industria de la celulosa. Su función es crucial para mantener la concentración adecuada de licor blanco que circula por el sistema, asegurando una digestión efectiva y eficiente de la madera para la producción de pulpa de papel.

Digestor - TK FLASH 1, 2 y 3 (241-23059, 241-23060, 241-23095): Los estanques flash se utilizan para reducir la presión y la temperatura del licor negro procedente del digestor, antes de su posterior tratamiento o recuperación.

Lavado - TK FILTRADO 1 y 2 LAVADOR DIFUSOR (246-22013, 246-22014): Proceso de lavado de la pulpa, manejando licor de lavado o pulpa diluida.

Lavado - TK FILTRADO DECKER REPULPADOR (246-22068) y TK FILTRO PRENSADO 1 (246-22118): Estos equipos están involucrados en el filtrado y procesamiento de la pulpa, manejando fluidos como agua con pulpa suspendida o licor de lavado.

4.3.2. Sistematización

En la fase de sistematización, una vez verificada la fiabilidad de la información recogida, se procede a organizar y clasificar los equipos. Esta etapa implica identificar las zonas específicas donde se ubican los equipos para efectuar una evaluación de la seguridad, así como en el análisis de los mecanismos de deterioro que están activos en los componentes bajo estudio.

Esta valiosa información, como lo son los históricos de inspección, manuales interactivos, etc. Dicha información ha sido proporcionada por el departamento de mantención predictiva de la empresa.

Como ejemplo tenemos el estanque de licor negro, perteneciente al área de digestor, el cual se puede sistematizar, a través de la identificación de la zona de operación, y luego revisando los mecanismos de deterioro en los que podría verse afectado. Luego se procede a la revisión de los históricos de inspección, y reparaciones que se han efectuado.

4.0 MEDICION DE ESPESORES

4.1 Manto

Niveles	0°	90°	180°	270°
N1	10,0	9,9	10,0	10,0
N2	10,0	9,9	9,9	9,8
N3	9,8	9,8	9,8	9,8
N4	9,9	9,9	10,0	9,8

Espesor Nominal: 10,0 mm

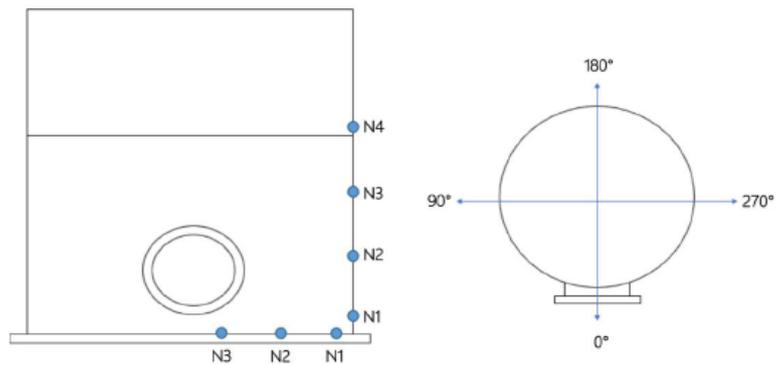
Espesor mínimo: 5,0 mm

4.2 Piso

Niveles	0	90	180	270
N1	9,9	9,8	10,5	10,4
N2	9,8	10,2	10,1	9,9
N3	9,9	10,1	10,1	9,8

Espesor Nominal: 10,0 mm

Espesor mínimo: 5,0 mm



Nota:

- Los valores son expresados en milímetros (mm)

Figura 24: Informe de inspección, estanque de licor negro. **Fuente:** Área Mantenimiento predictiva

Estos informes de inspección entregan conclusiones si existen mecanismos de deterioro activos, por ejemplo para el estanque de licor negro:

Conclusiones

- a) No se aprecian mecanismos de corrosión activos en los componentes principales del equipo.
- b) No se aprecian mecanismos de desgaste abrasivo que producen pérdida de espesor localiza o generalizada en los componentes del equipo.
- c) A partir de la medición de espesores realizada a los componentes principales del equipo, se obtienen valores homogéneos, detectando una tasa de desgaste mínima en los puntos de medición realizados en los componentes internos.
- d) De acuerdo con los resultados obtenidos de la inspección realizada se puede concluir que el equipo mantiene buen estado de integridad mecánica frente a las actuales condiciones de operación.

4.3.3. Cálculo de la Probabilidad de Falla

Para el cálculo de la PoF se evalúan diferentes factores, donde a cada factor se le asigna un valor numérico y cuya suma de factores determina el valor final de la probabilidad de falla.

4.3.3.1 Factor de equipamiento (EF)

El tamaño del estudio afectará la probabilidad de falla de un componente de estudio, según:

- Unidad: Se evalúa una unidad completa de operación. Comúnmente se hace para comparar y priorizar estas unidades basadas en el riesgo de operación. Usualmente mas de 150 equipos. $EF=15$
- Sección: Una unidad de operación puede ser partida en secciones funcionales lógicas para identificar la sección de mayores riesgos en la unidad.

Usualmente entre 20-150 equipos. EF=5

- Sistema o Unidad de Operación: Este es el mayor nivel de detalle que el método cualitativo está diseñado manejar.

Usualmente de 5-20 equipos mayores. EF = 0

4.3.3.2. Factor de Daño (DF)

Es una medición del riesgo asociado con el mecanismo del daño conocido que está activo o potencialmente activo en la operación en evaluación.

- Paso 1: Si existe conocimiento de mecanismos de daños activos que puedan causar agrietamientos en aceros al carbono y aceros de baja aleación. DF1=5
- Paso 2: Si existe el potencial de una falla catastrófica por fractura frágil, incluyendo materiales de acero al carbono debido a bajas temperaturas de operación o condiciones inestables, fragilidad debida a temple, o materiales no calificados adecuadamente por ensayos de impacto. DF2=4
- Paso 3: Si existe un lugar en la unidad donde la falla por fatiga mecánica inducida térmicamente y el mecanismo de fatiga pueda aún estar activo. DF3=4
- Paso 4: Si existe conocimiento que esté ocurriendo fallas por hidrogeno a altas temperaturas. DF4=3
- Paso 5: Si existe conocimiento de agrietamiento de los aceros inoxidable austeníticos como resultado del proceso. DF5=3
- Paso 6: ¿Está localizada la corrosión? DF6=3
- Paso 7: Si existe corrosión generalizada. DF7=2

- Paso 8: Si el daño por creep puede estar ocurriendo a altas temperaturas, incluyendo hornos y calentadores. DF8=1
- Paso 9: Si la degradación de materiales ocurre, con formación de fase sigma, esferoidización. DF9=1
- Paso 10: Si existe otro mecanismo de daño identificado. DF10=1
- Paso 11: Si existe un potencial mecanismo de daño que no haya sido evaluado y la inspección no se realice periódicamente por ingenieros de materiales calificados. DF=10

El Factor de daño final, será la suma de todos los pasos.

4.3.3.3 Factor de Inspección IF

Es una medida de la efectividad del programa de inspección para encontrar e identificar o anticipar el mecanismo de falla en la unidad, en el *anexo 2* de este documento, se puede observar los pasos para determinarlo.

La sumatoria de IF1, IF2 y IF3 darán el resultado final del valor IF. Estos factores presentan una sumatoria general en todos los equipos evaluados de -4 o -6, esto es debido a que en términos generales en el factor IF1 y IF2 existe un programa de inspección formal, pero no un programa de inspección extensivo.

Además el valor de IF3 también es -2 en los equipos evaluados ya que el programa de inspección no incluye una evaluación crítica de los resultados de inspección, como un análisis basado en API RP 579 (*Fitness for service*) para determinar la criticidad del equipo luego de la inspección

4.3.3.4. Factor de Condición CCF.

Su intención es evaluar la efectividad de los planes de mantenimiento y de los esfuerzos de la dirección.

El valor total del factor de condición es de 6 para los equipos evaluados, esto se debe al presentar cumplimiento de los estándares de la industria a nivel nacional.

4.3.3.5. Factor de Proceso PF

Es una medición del potencial de operaciones anormales o de alteraciones que pueden resultar en eventos que podrían conducir a una pérdida de confinamiento (escape, fuga, filtración).

4.3.3.6. Factor de Diseño Mecánico MDF

Evalúa ciertos aspectos del diseño mecánico de la unidad.

La evaluación de este factor se puede establecer en base a los planos de diseño del equipo comparando los códigos actuales y aquellos en los que fue construido, además de evaluar si las condiciones de operación continúan siendo aquellas para las que fueron diseñadas.

Hay que destacar que los estanques evaluados son diseñados bajo especificaciones y normas internacionales como son API 650. Además para el caso de otros estanques, como lo son los pertenecientes a DS43 (Decreto Supremo 43) se realizan rigurosas evaluaciones con empresas certificadoras.

De esta forma y al calcular todos los factores involucrados en la probabilidad de falla *figura 25*, se procede al cálculo de las consecuencias de falla.

Análisis Cualitativo de Riesgo



Figura 25: Diagrama factores de Probabilidad de Fallo en análisis cualitativo.

Luego de realizar el cálculo de todos los factores de probabilidad de falla, se suman y se genera la siguiente tabla:

Tabla 18: Sumatoria de factores para cálculo de PoF

Factor de Probabilidad Suma de los factores EF, DF, IF, CCF, PF, MDF		
Categoría de Probabilidad		Resultado
Factor	Categoría	Factor
0 - 15	1	22
16 - 25	2	
26 - 35	3	Categoría
36 - 50	4	
51 - 75	5	
		2

Fuente: Elaboración propia

4.3.4. Cálculo de la Consecuencia de falla por Daños

La evaluación de la consecuencia de falla por Daños sólo se debe realizar si el fluido presente en el equipo es inflamable y reactivo, si esto no ocurre, se debe omitir este apartado y avanzar al cálculo de la Consecuencia de falla por Toxicidad.

4.3.4.1. Factor Químico CF

Es la medida de la tendencia de los químicos a auto inflamarse. La respuesta en esta sección debería basarse en el material predominante o representativo en la corriente. Análisis separados deberían realizarse en la unidad con diferentes corrientes en el proceso.

A continuación se puede observar los pasos para calcular el factor químico CF:

- Paso 1: Determine el “Factor flash” usando el ranking de peligros de explosión de NFPA (el signo rojo del diamante del sistema de identificación NFPA). Ingrese el valor de peligro de inflamabilidad según NFPA.
- Paso 2: Determine el “Factor de Reactividad”, usando el sistema de clasificación de peligro por reactividad (el signo amarillo del diamante del sistema de identificación NFPA). Ingrese el valor de la clasificación de peligro de reactividad de la NFPA.
- Paso 3: Determine el factor químico:

	Factor de Reactividad				
	1	2	3	4	
Factor Flash	1	7	9	12	15
	2	10	12	15	20
	3	12	15	18	25
	4	13	15	20	25

Figura 26: Factor químico, factor flash vs reactividad, API RP 581

Si el factor flash o el factor de reactividad es 0, el valor de CF igual es 0 lo que **indicaría que no se debe realizar el análisis de Consecuencias por Daños.**

Para realizar el cálculo de los otros factores que incluye la consecuencia de falla por daños, se puede recurrir al Anexo 2, de este documento, puesto que no es necesario para el caso de estudio se omite el cálculo de estos factores.

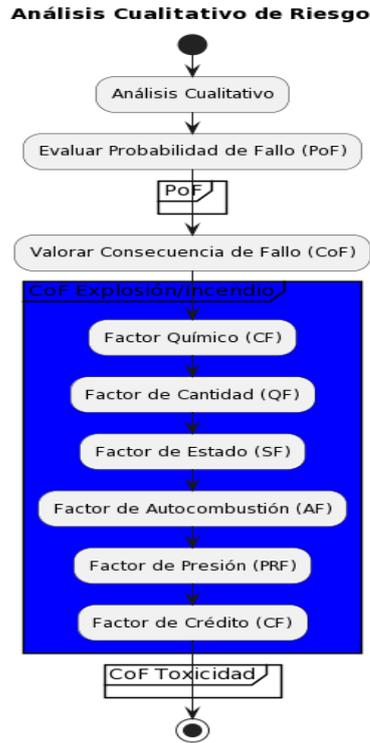


Figura 27: Diagrama factores consecuencia de daño en análisis cualitativo.

En este análisis, resultó que ninguno de los fluidos presentes en los equipos evaluados presenta niveles de inflamación y reactividad, solo se encontraron fluidos que presentan una de estas 2 características, pero no ambas, por lo que el valor de este corresponde a 0, indicando que la **categoría correspondiente por Consecuencias de daño es A.**

Para el cálculo de la CoF por daños se evalúan diferentes factores, donde a cada factor se le asigna un valor numérico y cuya suma de factores determina el valor final el cual se ubicará en la categoría correspondiente según la *tabla 19*:

Tabla 19: Evaluación de los factores de consecuencia de daño

Factor de Consecuencia de Daño Suma de los factores CF, QF, SF, AF, PRF, CF		
Categoría de Consecuencia de Daño		Resultado
Factor	Categoría	Factor
0 - 19	A	0
20 - 34	B	
35 - 49	C	
50 - 69	D	Categoría
> 70	E	A

Fuente: Elaboración Propia

4.3.5. Cálculo de la Consecuencia por Toxicidad

Los factores presentes en el cálculo de consecuencias por toxicidad están compuestos por la cantidad de material tóxico que puede ser liberado en el área de afectación, la capacidad del fluido para dispersarse, los sistemas de mitigación presentes en el área, y la cantidad de personas que podrían resultar afectadas por consecuencias de fugas.

4.3.5.1 Factor de Cantidad Tóxica TQF

Es una medida que evalúa la cantidad y la toxicidad del material. En anexo 2 de este documento se pueden observar cómo determinar el valor del factor de cantidad tóxica, referente a la cantidad disponible dentro del equipo que pueda ser liberado al medio ambiente (medido por libras “pounds”), y el factor de toxicidad del fluido según la normativa NFPA 704.

- Paso 1: Es una medida de cuantificación tanto química como tóxica que puede perderse en un evento de fuga.

- Paso 2: Estimación del factor de toxicidad basada en el diamante azul del sistema de identificación de peligro NFPA.

NFPA	Factor Tóxico
1	-20
2	-10
3	0
4	20

4.3.5.2. Factor de Dispersión DIF

Es una medida que tiene el material para dispersarse, dada las condiciones comunes de procesos. El valor DIF se calcula según el punto de ebullición del fluido contenido.

Tabla 20: Factor dispersión DIF (°C)

Paso 1: Determinar el factor de dispersión	
Punto de ebullición (°C)	Dispersión
< -1	1
-1 – 27	0,5
27 – 60	0,3
60 – 93	0,1
93 – 149	0,05
> 149	0,03

Fuente: Elaboración propia, basado en API RP 581

4.3.5.3. Factor de Crédito CRF

Características de seguridad que reducen las consecuencias de una fuga tóxica por detección, aislamiento y mitigación.

4.3.5.4. Factor de Población PPF

Factor que mide el potencial número de personas que puedan ser afectadas por un evento tóxico.

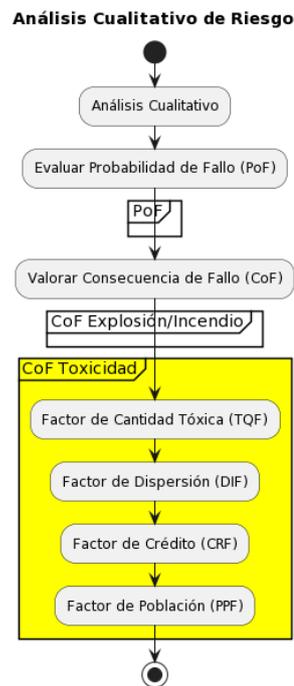


Figura 28: Diagrama factores de consecuencia de salud en análisis cualitativo

Luego de calculado todos los factores de probabilidad y consecuencia de daño / salud en el análisis cualitativo, se procede a generar las matrices de riesgo correspondientes.

CAPITULO 5. RESULTADOS

Para el análisis de resultados de los 11 equipos, se utilizará el documento desarrollado en Excel “Libro RBI” para presentar los valores de riesgo asociado a cada equipo evaluado.

Un ejemplo de los resultados obtenidos se puede observar en la *figura 29 - 30 y 31*, en las cuales se muestran los resultados obtenidos a través de la aplicación de la metodología al Estanque de Licor Negro 241-22170, perteneciente al área de digestor. Estos resultados visualizan los factores más influyentes en el cálculo.

Factor de Probabilidad Suma de los factores EF, DF, IF, CCF, PF, MDF		
Categoría de Probabilidad		Resultado
Factor	Categoría	Factor
0 - 15	1	22
16 - 25	2	
26 - 35	3	
36 - 50	4	
51 - 75	5	2

Factor	Valor
Factor de Equipo (EF)	5
Factor de Daño (DF)	10
Factor de Inspección (IF)	-7
Factor de Condición	6
Factor de Proceso (PF)	6
Factor de Diseño Mecánico	2

Figura 29: Factor de probabilidad de falla, Estanque Licor Negro 241-22170

Factor de Consecuencia de Daño Suma de los factores CF, QF, SF, AF, PRF, CRF		
Categoría de Consecuencia de Daño		Resultado
Factor	Categoría	Factor
0 - 19	A	0
20 - 34	B	
35 - 49	C	
50 - 69	D	
> 70	E	A

Figura 30: Factor consecuencia de daño, Estanque Licor Negro 241-22170

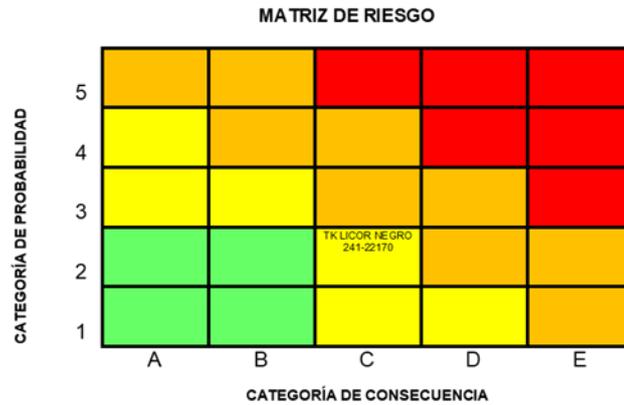
Se debe recordar que para la consecuencia de daño, la evaluación de los equipos entregó un factor 0, lo que posiciona a todos los equipos en la categoría A, por lo que no es relevante en ESTE ESTUDIO en particular. Por lo tanto, la consecuencia de salud será la encargada de contribuir al riesgo asociado a cada equipo.

Factor de Consecuencia de Salud Suma de los factores TQF, DIF, CRF, PPF		
Categoría de Consecuencia de Salud		Resultado
Factor	Categoría	Factor
< 10	A	23,5
10 - 19	B	
20 - 29	C	
30 - 39	D	Categoría
> 40	E	C

Matriz Consecuencia de Salud	
Factor	Valor
Factor de Cantidad Tóxica (TQF)	15
Factor de Dispersión (DIF)	0,5
Factor de Crédito (CRF)	1
Factor de Población (PPF)	7

Figura 31: Factor consecuencia de salud, Estanque de Licor Negro 241-22170

Los resultados obtenidos se presentan en la *figura 32*, donde ya se establece el par ordenado que le corresponde en la matriz de riesgo según su categoría de probabilidad y consecuencia. Como resultado se observa que este equipo presenta un valor de riesgo Mediano, lo que en la matriz de riesgo se ejemplifica con la casilla de color amarillo que equivaldría a una inspección para ese equipo cada 18-24 meses.



Categoría de Probabilidad	2
Categoría de Consecuencia de Daño	A
Categoría de Consecuencia de Salud	C

Figura 32: Evaluación de riesgo, Estanque de Licor Negro 241-22170

Los resultados obtenidos de los factores de probabilidad y consecuencia de cada equipo, como la matriz de riesgo se entregan en sus respectivos libros RBI. Estos libros RBI poseen 9 páginas, las cuales entregan los cálculos de la probabilidad y consecuencia de falla para cada equipo perteneciente al estudio.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

La adopción de este enfoque proactivo es un paso adelante hacia el mejoramiento de la seguridad y la operatividad eficiente de la planta, con el objetivo adicional de situar a Celulosa Arauco a la vanguardia en la aplicación de sistemas avanzados de mantenimiento predictivo y administración de riesgos. La metodología de Inspección Basada en Riesgo (RBI), fundamentada en las normativas API 580 y 581, se reconoce como una táctica indispensable para un proceso de toma de decisiones bien fundamentado y para una gestión eficaz de los riesgos operacionales.

La aplicación de la metodología RBI a 11 equipos del área de fibra, junto con los 67 previamente analizados por una empresa externa en el área de caustificación y licor, sientan las bases para una mejora continua y establece un sólido punto de partida para la realización de futuras evaluaciones.

Gracias a esto, Celulosa Arauco está en capacidad de ordenar y controlar con eficiencia los riesgos internos, identificando factores de riesgo concretos y forjando estrategias de mitigación adecuadas.

Para finalizar, este estudio sienta las bases para expandir la aplicación de la metodología RBI a otros equipos de la planta, junto con proporcionar una guía estructurada para la inclusión de nuevos equipos.

OBJETIVO	
Implementar la metodología de inspección basado en riesgo (RBI), con el fin de facilitar las labores de inspección de equipos y componentes, a través de la jerarquización de la criticidad de estos.	
Objetivos Específicos	Observación
<ul style="list-style-type: none"> • Identificar mecanismos de daño activos en equipos y componentes, en área fibra. 	<p>Se identificaron, a través de recolección histórica de informes de inspección, como hojas de seguridad, materialidad, sumado a la identificación y evaluación que se pueden obtener apoyándose de la literatura y normas API, como lo son:</p> <p>API 653, API 575 y API 571</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Aplicar método cualitativo de análisis de riesgo, según practicas recomendadas API 580 y 581. 	<p>Se aplico la metodología basada en riesgo a 11 equipos estáticos del área de fibra, utilizando API 580 y 581.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Estimar el riesgo y definir criticidad de equipos evaluados. 	<p>Se elaboraron 11 libros RBI, los cuales corresponden a los equipos en estudio. Estos libros poseen todos los factores de probabilidad y consecuencia de falla.</p>

<ul style="list-style-type: none">• Definir la frecuencia de inspección para cada uno de los equipos evaluados	Se confecciono un administrador de riesgo, el cual es una herramienta de jerarquización, la que incluye las frecuencias de inspección.
--	--

RECOMENDACIONES

Para aquellos equipos identificados como críticos, se recomienda la implementación del análisis cuantitativo. Esta profundización en el análisis no solo incrementará la confiabilidad de los equipos, sino que también potenciará el reconocimiento de la empresa por emplear una metodología avalada por el Instituto Americano del Petróleo y respaldada por la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos.

Recomendaciones futuras:

Expansión del Análisis: Continuar la expansión del análisis RBI a todos los equipos de la planta, asegurando una gestión de riesgo uniforme y metódica en todas las operaciones.

Integración de Tecnología Avanzada: Incorporar tecnologías avanzadas y herramientas analíticas para mejorar la precisión en la detección de condiciones potencialmente peligrosas y predecir con mayor exactitud el deterioro de los equipos.

- Se recomienda realizar un histórico de fallas para los equipos.

Evaluación Periódica: Establecer un protocolo para la revisión y actualización periódica de la metodología aplicada, asegurando que se mantenga alineada con los avances tecnológicos y los cambios en la normativa.

- Se recomienda repetir cíclicamente el procedimiento de análisis RBI para ajustar los periodos entre años de inspección para los equipos.

Colaboración Interdisciplinaria: Fomentar la colaboración entre diferentes departamentos para integrar conocimientos y experiencias que enriquezcan el proceso de análisis de riesgo.

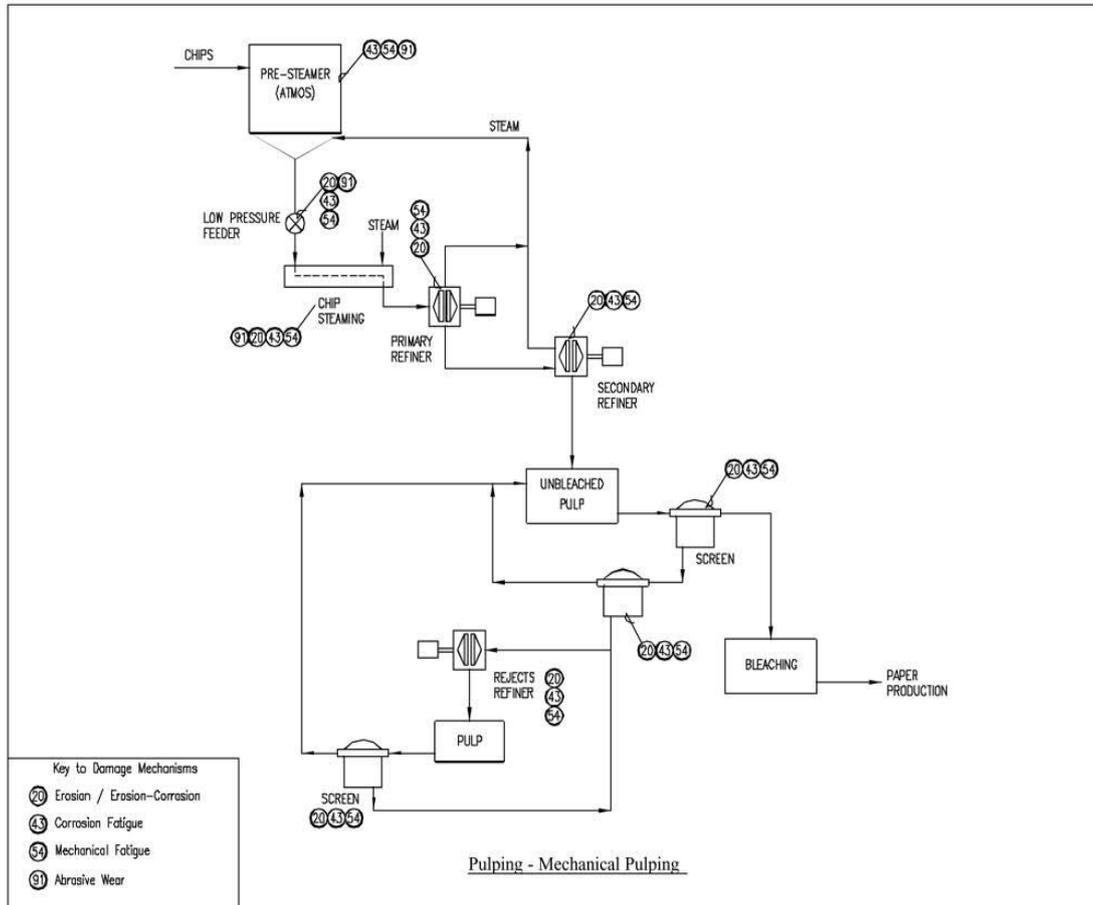
REFERENCIAS

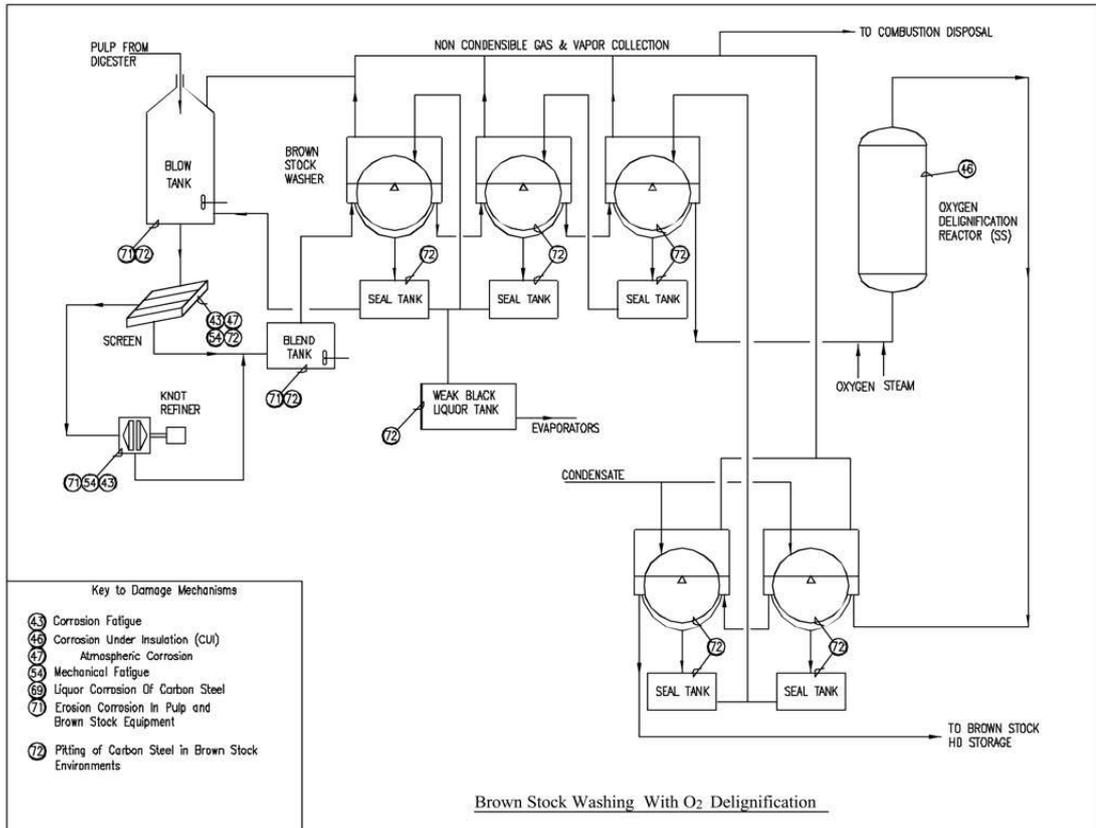
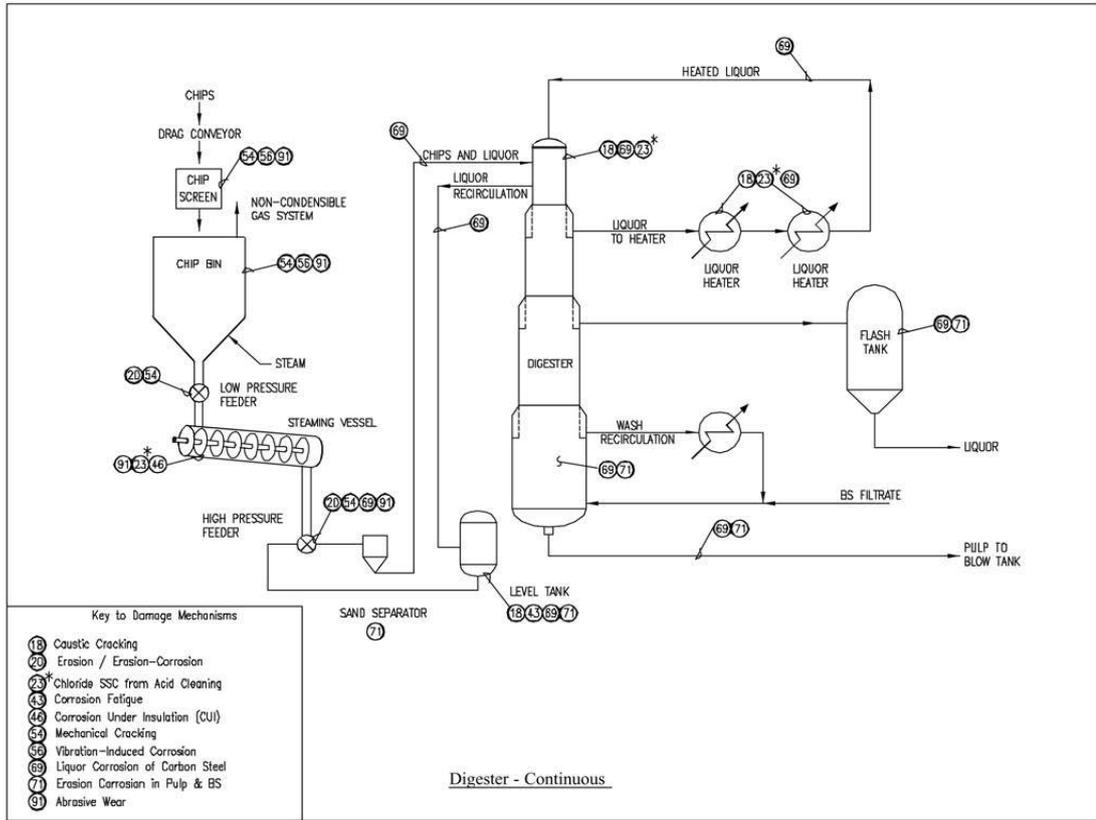
- [1] E. Meneses Ramirez, K. More Palacios, U. Siccha Jara, and G. Verastegui Cuba Angie Espinoza Cruz, “INSPECCIÓN BASADA EN EL RIESGO (IBR-API RP 580) RISK BASED INSPECTION (RBI-API RP 580).”
- [2] “La inspección basada en riesgo y su importancia - Predictiva21.” Accessed: Jan. 03, 2024. [Online]. Available: <https://predictiva21.com/inspeccion-basada-riesgo/>
- [3] “API Recommended Practice 580: Risk-Based Inspection,” 2016.
- [4] “API Recommended Practice 581: Risk-Based Inspection Methodology,” 2016.
- [5] “Inicio | IQSPERSONAS.” Accessed: Jan. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.iqscompany.com/>
- [6] “API.” Accessed: Jan. 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.api.org/>
- [7] R. H. Perry and D. W. Green, *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 8th ed. New York, 2008.
- [8] J. Wiley and Sons, *Distillation Design and Control Using Aspen Simulation*. 2016.
- [9] G. A. Smook, *Handbook for Pulp & Paper Technologists*, 4th ed. 2016.
- [10] “API STANDARD 650 (2020) - Welded Tanks for Oil Storage”.
- [11] *Introduction to Nondestructive Testing: A Training Guide*. American Society for Nondestructive Testing, 2016.
- [12] “Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry,” 2020.

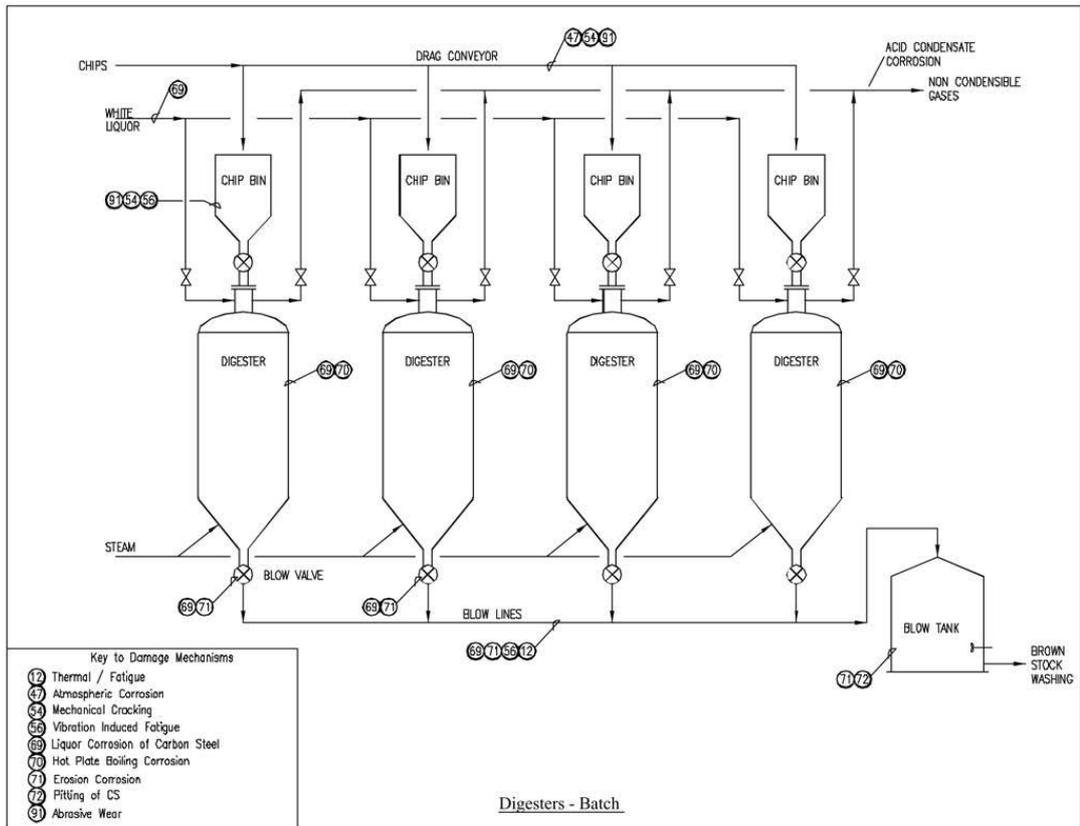
- [13] J. D. Dobis and D. C. Bennett, "Welding Research Council Bulletin in DAMAGE MECHANISMS AFFECTING FIXED EQUIPMENT IN THE PULP AND PAPER INDUSTRY," 2004, [Online]. Available: www.forengineers.org
- [14] "Inspection Practices for Atmospheric and Low-pressure Storage Tanks," 2020.
- [15] E. de J. Materan Linares and E. A. Rojas Monsalve, "Metodología Integral para el Diseño y Optimización de planes de inspección".
- [16] "API RP 581 Risk-based Inspection Methodology" API 581 Part 2. Washington D.C: American Petroleum Institute, 2016.
- [17] *NFPA 704: Standard System for the Identification of the Hazards of Materials for Emergency Response*. 2017.
- [18] *API RP 581 Risk-based Inspection Methodology, API RP 581 Part 3 – Conseq. Fail. Methodol.* Washington D.C, 2016.
- [19] E. Meneses Ramirez, K. More Palacios, U. Siccha Jara, and G. Verastegui Cuba Angie Espinoza Cruz, "INSPECCIÓN BASADA EN EL RIESGO (IBR-API RP 580) RISK BASED INSPECTION (RBI-API RP 580)."

ANEXOS

Anexo 1: Mecanismos de daños en la industria papelera, área fibra, según [13]







Anexo 2: Tabla para cálculo de los factores Pof y Cof según API 581

<p>Equipment Factor (EF)</p> <p>The size of the study will affect the probability of failure of a component in the study. The qualitative risk analysis is intended for use at three different levels:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Unit—A full operating unit at a site is evaluated. This would typically be done to compare and prioritize operating units based on risk of operation. 2. Section of an operating unit—an operating unit can be broken into logical (functional) sections to identify the high risk section of the unit. 3. A system or unit operation—this is the greatest level of detail that the qualitative method is intended to address. 	
<p>To define the Equipment Factor, use the following table:</p> <p>If a full operating unit is being evaluated, (typically greater than 150 major equipment items) EF = 15</p> <p>If a major section of an operating unit is being evaluated, (typically 20–150 major equipment items) EF = 5</p> <p>If a system or unit operation is being evaluated (typically 5–20 major equipment items) EF = 0</p> <p>Select the appropriate value for EF from above.</p>	
<p>This is the overall Equipment Factor</p>	
1	

<p>Damage Factor (DF) The damage factor is a measure of the risk associated with known damage mechanisms that are active or potentially active in the operation being evaluated. The mechanisms are prioritized based on their potential to create a serious event.</p>		
If there are known, active damage mechanisms that can cause corrosion cracking in carbon or low alloy steels, DF1 = 5.	2	
If there is a potential for catastrophic brittle failure, including carbon steel materials due to low temperature operation or upset conditions, temper embrittlement, or materials not adequately qualified by impact testing, DF2 = 4.	3	
If there are places in the unit where mechanically thermally-induced fatigue failure has occurred and the fatigue mechanism might still be active, DF3 = 4.	4	
If there is known high temperature Hydrogen attack occurring, DF4 = 3.	5	
If there is known corrosion cracking of austenitic stainless steels occurring as a result of the process, DF5 = 3.	6	
If localized corrosion is occurring, DF6 = 3.	7	
If general corrosion is occurring, DF7 = 2.	8	
If creep damage is known to be occurring in high temperature processes, including furnaces and heaters, DF8 = 1.	9	
If materials degradation is known to be occurring, with such mechanisms as sigma phase formation, carburization, spheroidization, etc., DF9 = 1.	10	
If other active damage mechanisms have been identified, DF10 = 1.	11	
If the potential damage mechanisms in the operating unit have not been evaluated and are not being periodically reviewed by a qualified materials engineer, DF11 = 10.	12	
The overall Damage Factor will be the sum of lines 2 through 12, up to a maximum of 20	13	

<p>Inspection Factor (IF) The Inspection Factor is a measure of the effectiveness of the inspection program to identify the active or anticipated damage mechanisms in the unit.</p>		
<p>Step 1. Vessel Inspection—Gage the effectiveness of the vessel inspection program to find the identified failure mechanisms above.</p> <ul style="list-style-type: none"> • If the inspection program is extensive and a variety of inspection methods and monitoring are being used, IF1 = -5. • If there is a formal inspection program in place and some inspections are being done, but primarily visual and UT thickness readings, IF1 = -2. • If there is no formal inspection program in place, IF1 = 0. <p>Select appropriate IF1 from above.</p>	14	
<p>Step 2. Piping Inspection—Gage the effectiveness of the piping inspection program to find the identified failure mechanisms above.</p> <ul style="list-style-type: none"> • If the inspection program is extensive, and a variety of inspection methods are being used, IF2 = -5. • If there is a formal inspection program in place and some inspections are being done, but primarily visual and UT thickness readings, IF2 = -2. • If there is no formal inspection program in place, IF2 = 0. <p>Select the appropriate value for IF2 from above</p>	15	
<p>Step 3. Overall Inspection Program—How comprehensive is the inspection program design, and are the inspection results evaluated and used to modify the inspection program?</p> <ul style="list-style-type: none"> • If deterioration mechanisms have been identified for each equipment item and the inspection program is modified based on the results of the program using a competent inspector or materials engineer, IF3 = -5. • If the inspection program design excludes either identification of failure mechanisms or does not include critical evaluation of all inspection results, i.e., it does one or the other, but not both, IF3 = -2. • If the inspection program meets neither of the criteria of the previous paragraph, IF3 = 0. <p>Select the appropriate value for IF3 from the table above.</p>	16	
The overall Inspection Factor is the sum of lines 14 through 16, but its absolute value cannot exceed the value of the Damage Factor (line 13).	17	

Condition Factor (CCF) The Condition Factor is intended to gage the effectiveness of plant maintenance and housekeeping efforts.		
Step 1. In a plant walkthrough, how would the plant housekeeping be judged (including painting and insulation maintenance programs)? <ul style="list-style-type: none"> • Significantly better than industry standards, CCF1 = 0. • About industry standard, CCF1 = 2. • Significantly below industry standards, CCF1 = 5. Select the appropriate value for CCF1 from above	18	
Step 2. The quality of plant design and construction is: <ul style="list-style-type: none"> • Significantly better than industry standards, where the owner has used more rigorous standards, CCF2 = 0. • About industry standard, where typical contract standards were used, CCF2 = 2. • Significantly below industry standards, CCF2 = 5. Select the appropriate value for CCF2 from above	19	
Step 3. In a review of the effectiveness of the plant maintenance program, including fabrication, PM programs, and QA/QC, they would be judged: <ul style="list-style-type: none"> • Significantly better than industry standards, CCF3 = 0. • About industry standard, CCF3 = 2. • Significantly below industry standards, CCF3 = 5. Select the appropriate value for CCF3.	20	
The overall Condition Factor is the sum of 18 through 20.	21	

Process Factor (PF) The Process Factor is a measure of the potential for abnormal operations or upset conditions to result in initiating events that could lead to a loss of containment.														
Step 1. The number of planned or unplanned process interruptions in an average year. (This is intended for normal continuous process operations.) PF1 is taken from the following table: <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th>Number of Interruptions</th> <th>PF1</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0 to 1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>2 to 4</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>5 to 8</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>9 to 12</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>more than 12</td> <td>5</td> </tr> </tbody> </table> Determine appropriate PF1 from above.	Number of Interruptions	PF1	0 to 1	0	2 to 4	1	5 to 8	3	9 to 12	4	more than 12	5	22	
Number of Interruptions	PF1													
0 to 1	0													
2 to 4	1													
5 to 8	3													
9 to 12	4													
more than 12	5													
Step 2. Assess the potential for exceeding key process variables in the operation being evaluated: (PF2). <ul style="list-style-type: none"> • If the process is extremely stable, and no combination of upset conditions is known to exist that could cause a runaway reaction or other unsafe conditions, PF2 is 0. • Only very unusual circumstances could cause upset conditions to escalate into an unsafe situation, PF2 is 1. • If upset conditions are known to exist that can result in accelerated equipment damage or other unsafe conditions, PF2 is 3. • If the possibility of loss of control is inherent in the process, PF2 is 5. Select the appropriate value for PF2 from the table above	23													
Step 3. Assess the potential for protection devices, such as relief devices and critical sensing elements, to be rendered inoperative as a result of plugging or fouling of the process fluid. <ul style="list-style-type: none"> • Clean service, no plugging potential PF3 = 0. • Slight fouling or plugging potential PF3 = 1. • Significant fouling or plugging potential PF3 = 3. • Protective devices have been found impaired in service PF3 = 5. Select the appropriate value for PF3.	24													
The overall Process Factor is the sum of lines 22 through 24.	25													

<p>Mechanical Design Factor (MDF) The Mechanical Design Factor gages certain aspects of the design of the operating equipment.</p>		
<p>Step 1.</p> <ul style="list-style-type: none"> • If equipment can be identified that was not designed to the intent of current codes or standards, MDF1 = 5. Examples: nonimpact tested carbon steel in low temperature service, materials in hydrogen service operating above the latest Nelson curve, nonstress relieved materials in a particular service (such as caustic), or plate thicknesses that would require stress relieving by current code or good practices. • If all equipment being considered is designed and maintained to the Codes in effect at the time it was constructed, MDF1 = 2. • If all equipment being considered is designed and maintained to current codes, MDF1 = 0. <p>Enter the appropriate value from the statements above. This is MDF1.</p>		26
<p>Step 2.</p> <ul style="list-style-type: none"> • If the process being evaluated is unusual or unique or any of the process design conditions are extreme, MDF2 = 5. Extreme Design Conditions are considered to be: <ul style="list-style-type: none"> a. Pressure exceeding 10,000 psi. b. Temperature exceeding 1500 °F. c. Corrosive conditions requiring high alloy materials (more exotic than 316 stainless steel). • If the process is common, with normal design conditions, MDF2 = 0. <p>Select the appropriate value from the table above. This is MDF2.</p>		27
<p>Step 3. Add lines 26 and 27. This is the Mechanical Design Factor.</p>		28

<p>Likelihood Category</p>														
<p>Step 1. Determine the Likelihood Factor. The Likelihood Factor is the sum of the previously determined factors.</p> <p>Add lines 1, 13, 17, 21, 25, and 28. This is the Likelihood Factor.</p>		29												
<p>Step 2. The Likelihood Category is determined from the Likelihood Factor (line 29 above) using the following table:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Likelihood Factor</th> <th>Likelihood Category</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0–15</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>16–25</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>26–35</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>36–50</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>51–75</td> <td>5</td> </tr> </tbody> </table> <p>Enter the Likelihood Category.</p>		Likelihood Factor	Likelihood Category	0–15	1	16–25	2	26–35	3	36–50	4	51–75	5	30
Likelihood Factor	Likelihood Category													
0–15	1													
16–25	2													
26–35	3													
36–50	4													
51–75	5													

Tablas para cálculo consecuencia de daño

<p>Factor Químico (CF) El Factor Químico es una medida de la tendencia química inherente a inflamarse. La respuesta a esta sección se basa en si el derrame del material es predominante o representativo. Un análisis separado se realiza si la unidad presenta un número de diferentes procesos de derrame.</p>																																						
<p>Paso 1. Determinar el Factor de inflamabilidad usando el NFPA Flammable Hazard Rating (el diamante RED en el NFPA Hazard Identification System es la señal). Ingresar el NFPA Flammable Hazard Rating.</p>	31																																					
<p>Paso 2. Determinar un Factor de Reactividad usando el NFPA Reactivity Hazard Rating System (El diamante YELLOW en el NFPA Hazard Identification System es la señal). Ingresar el NFPA Reactivity Hazard Rating.</p>	32																																					
<p>Paso 3. Determinar el "Factor Químico."</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th colspan="5">Factor de Reactividad (Línea 32)</th> </tr> <tr> <th></th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Factor de inflamabilidad (Línea 31)</td> <td>1</td> <td>7</td> <td>9</td> <td>12</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td></td> <td>2</td> <td>10</td> <td>12</td> <td>15</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td></td> <td>3</td> <td>12</td> <td>15</td> <td>18</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td></td> <td>4</td> <td>13</td> <td>15</td> <td>20</td> <td>25</td> </tr> </tbody> </table>				Factor de Reactividad (Línea 32)						1	2	3	4		Factor de inflamabilidad (Línea 31)	1	7	9	12	15		2	10	12	15	20		3	12	15	18	25		4	13	15	20	25
	Factor de Reactividad (Línea 32)																																					
	1	2	3	4																																		
Factor de inflamabilidad (Línea 31)	1	7	9	12	15																																	
	2	10	12	15	20																																	
	3	12	15	18	25																																	
	4	13	15	20	25																																	
<p>Seleccione el Factor Químico del cuadro superior.</p>	33																																					

<p>Factor de Cantidad (QF) El Factor de Cantidad representa la suma de material que contiene una unidad en un solo escenario.</p>																										
<p>El Factor de Cantidad se asume directamente del cuadro inferior. Para la cantidad de material liberado, usar la cantidad mayor de combustible de la lista que puede ser perdido en un evento de escape particular.</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Material Liberado</th> <th>Factor de Cantidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td><1.000 libras</td><td>15</td></tr> <tr><td>1K - 2K libras</td><td>20</td></tr> <tr><td>2K - 10K libras</td><td>25</td></tr> <tr><td>10K - 30K libras</td><td>28</td></tr> <tr><td>30K - 80K libras</td><td>31</td></tr> <tr><td>80K -200K libras</td><td>34</td></tr> <tr><td>200K - 700K libras</td><td>37</td></tr> <tr><td>700K - 1 millón</td><td>39</td></tr> <tr><td>1 - 2 millón</td><td>41</td></tr> <tr><td>2 - 10 millón</td><td>45</td></tr> <tr><td>> millón</td><td>50</td></tr> </tbody> </table> <p>Ingresar el valor apropiado de la tabla anterior. Este es el Factor de Cantidad.</p>			Material Liberado	Factor de Cantidad	<1.000 libras	15	1K - 2K libras	20	2K - 10K libras	25	10K - 30K libras	28	30K - 80K libras	31	80K -200K libras	34	200K - 700K libras	37	700K - 1 millón	39	1 - 2 millón	41	2 - 10 millón	45	> millón	50
Material Liberado	Factor de Cantidad																									
<1.000 libras	15																									
1K - 2K libras	20																									
2K - 10K libras	25																									
10K - 30K libras	28																									
30K - 80K libras	31																									
80K -200K libras	34																									
200K - 700K libras	37																									
700K - 1 millón	39																									
1 - 2 millón	41																									
2 - 10 millón	45																									
> millón	50																									
<p>Factor de Estado El Factor de Estado depende de el punto de ebullición normal del fluido, es una indicación de la tendencia normal del fluido para evaporarse y dispersarse cuando es liberado en el ambiente</p>																										
<p>Seleccionar el Factor de Estado basado en la temperatura de ebullición normal (Presión Atmosférica)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>T_b(°F)</th> <th>Factor de Estado</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Por debajo de -100</td><td>8</td></tr> <tr><td>-100 a 100</td><td>6</td></tr> <tr><td>100 a 250</td><td>5</td></tr> <tr><td>250 a 400</td><td>1</td></tr> <tr><td>Por encima de 400</td><td>-3</td></tr> </tbody> </table> <p>Seleccionar el valor adecuado de la tabla anterior. Este es el Factor de Estado.</p>			T _b (°F)	Factor de Estado	Por debajo de -100	8	-100 a 100	6	100 a 250	5	250 a 400	1	Por encima de 400	-3												
T _b (°F)	Factor de Estado																									
Por debajo de -100	8																									
-100 a 100	6																									
100 a 250	5																									
250 a 400	1																									
Por encima de 400	-3																									
<p>34</p>																										
<p>35</p>																										

<p>Factor de Autoignición (AF) El Factor de Autoignición es una sanción aplicada a fluidos que están siendo procesados a una temperatura por encima de la temperatura de autoignición</p>										
<p>Si un fluido es procesado por debajo de este AIT, registrar 10 -Si el fluido es procesado sobre este AIT, usar la siguiente tabla para determinar AF, basado en el punto de ebullición del fluido (en grados Fahrenheit)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>T_b (°F)</th> <th>Factor AF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Por debajo de 0</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>0 a 300</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>Por encima de 300</td> <td>13</td> </tr> </tbody> </table> <p>Ingresar el valor apropiado de la tabla anterior. Este es el factor de autoignición.</p>		T _b (°F)	Factor AF	Por debajo de 0	3	0 a 300	7	Por encima de 300	13	36
T _b (°F)	Factor AF									
Por debajo de 0	3									
0 a 300	7									
Por encima de 300	13									
<p>Factor de Presión (PRF) El Factor de Presión representa la tendencia de los fluidos a ser rápidamente liberados, resultando en un gran cambio de efecto tipo - instantáneo.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Si el fluido que está dentro del equipo es un líquido, ingresar 10. - Si el fluido que está dentro del equipo es un gas, y a una presión mayor que 150psig, ingresar 10. - Si ninguna de las condiciones anteriores es verdad, ingresar -15. 										
<p>Seleccionar le valor apropiado de la tabla anterior. Este es el factor de presión.</p>		37								

Factor de Crédito (CF) El Factor de Crédito es el producto de varios subfactores de sistemas de ingeniería que pueden disminuir el daño que ocasione un evento en el sitio.		
Si hay detección de gas en el lugar, cuando se presenta un escape incipiente de 50% o más. Ingresar -1, de otro modo, ingresa 0.	38	
Si el equipo en proceso está operando normalmente bajo una atmósfera inerte. Ingresar -1, de otro modo, ingresar 0	39	
Si el sistema para combatir el fuego es "seguro" en el evento de un incidente mayor (es decir, Un sistema de agua contra incendios, en caso de un evento de explosión permanece intacto), ingresar -1, de otro modo, ingresar 0.	40	
Si la capacidad de aislamiento del equipo en esta área puede ser remotamente controlada, AND: - El aislamiento y la instrumentación adecuada es protegida de incendios y explosiones, entonces ingresar -1. - O, si el aislamiento y la instrumentación asociada es protegida de incendios solamente, ingresar -1. - o, si no hay protección para la capacidad de aislamiento de incendio y explosiones, ingresar -1. De otro modo, ingresar 0.	41	
Si hay explosión alrededor de las paredes de los equipos más críticos (generalmente altas presiones), ingresar -1, de otro modo, ingresa 0.	42	
Si hay un basurero, drenaje o un sistema de escape el cual reinventaría el 75% o más del material en 5 minutos o menos, con el 90% de confiabilidad, ingrese -1, en vez de 0.	43	
Si hay una prueba de fuego en el sitio tanto en estructuras y cables, ingresar -1, si hay una prueba de fuego incluso en otras estructuras o cables, ingresar 0.95, de otro modo ingresar 0.	44	
Si hay un suministro de agua para incendios el cual estaría al menos 4 horas, ingresar -1, de otro modo, ingresar 0.	45	
Si hay un sistema fijo de espumas en el sitio, ingresar -1, en vez de, ingresar 0.	46	
Si existe monitoreo de el agua contra incendios el cual puede alcanzar todas las áreas de la unidad afectada, ingresar -1, de otro modo, ingresar 0.	47	
Sumar las líneas del 38 al 47. Este es el Factor de Crédito.	48	

Categoría Consecuencias de Daño		
Paso 1. Determinar el Factor de Consecuencia de Daño. Sumar las líneas 33, 34, 35, 36, 37 hasta 48, este es el Factor de Consecuencia de Daño.	49	
Paso 2. El Factor de Consecuencia de Daño (línea 49) es convertido a la Categoría de Consecuencia de Daño basado en la tabla siguiente		
Factor de Consecuencia	Categoría de Consecuencia	
0 - 19	A	
20 - 34	B	
35 - 49	C	
50 - 79	D	
> 70	E	
Ingresar la Categoría de Consecuencia de daño.	50	

Tablas para cálculo consecuencia de salud

Factor Tóxico Cuantitativo (TQF)		
El Factor Tóxico Cuantitativo es una medida de la cantidad de químico y su toxicidad.		
Paso 1. El Factor Tóxico Cuantitativo es tomado directamente del cuadro de abajo. De la suma de liberación de químico, utilizando grandes sumas de inventario tóxico que puede ser perdido en un evento de escape particular.		
Material Liberado	Factor de Cantidad	
<1,000 libras	15	
1K - 10K libras	20	
10K - 100K libras	27	
>1 millón de libra	35	
Ingresar el factor del cuadro anterior, este es TQF1.	51	
Paso 2. Estimar el Factor de Toxicidad (TQF2) del cuadro de abajo, basado en el diamante azul en la NFPA Hazard Identification System.		
NFPA Nh	Factor de Toxicidad	
1	-20	
2	-10	
3	0	
4	20	
Ingresar el Factor de Toxicidad	52	
Paso 3. Sumar las líneas 51 y 52. Este es el Factor Cuantitativo de toxicidad.	53	

Factor de Dispersión (DIF) El Factor de Dispersión es la medida de la habilidad que tiene el material para dispersarse, en condiciones típicas de proceso					
Paso 1. Determinar el Factor de Dispersión de la Tabla de abajo					
(F)	Factor	Punto de Ebullición (°F)	Dispersión		
.		< 30	1		
.		30 - 80	0,5		
.		80 - 140	0,3		
.		140 -200	0,1		
.		200 - 300	0,05		
.		>300	0,03		
Ingresar el Factor de Dispersión				54	

Factor de Crédito (CRF) El Factor de Crédito considera muestras de seguridad para que se reduzcan las consecuencias de una liberación toxica por detección, aislamiento y mitigación.					
Paso 1.					
-Si hay detectores en el sitio del proceso del fluido de interés que detecten el 50% o más de escape incipiente, ingresar -1.					
- De otro modo, ingresar 0				55	
Paso 2.					
- Si recipientes mas grandes que contienen este material pueden ser automáticamente aislados, y el aislamiento es iniciado por una alta lectura del detector de material toxico, ingresar -1.					
- O, si el aislamiento es remoto con una iniciación manual, ingresar -5.					
- O, si el aislamiento solamente es manualmente operado, ingresar -25.					
- De otro modo ingresar 0.				56	
Paso 3.					
- Si hay un sistema en el sitio (cortinas de agua, etc.) que prueben ser efectivos en mitigación en mínimo el 90% de el fluido, ingresar -5.					
- De otro modo ingresar 1,0.				57	
Paso 4. Sumar las líneas 55 a 57. Este es el Factor de Crédito				58	

Factor de Población (PPF) El Factor de Población es la medida del número potencial de personas que pueden ser afectadas por un evento toxico.		
Estimar el Factor de Población por el cuadro de abajo. Este es basado en el número de personas, en promedio, dentro de un cuarto de milla del punto de escape. Considerar la población dentro del sitio y fuera del sitio. Dentro de los límites de la planta, contar la población durante el día.		
Número de Personas dentro de un Radio de un Cuarto de Milla	Factor Población	
< 10	0	
10 - 100	7	
100 - 1000	15	
1000 - 10000	20	
Ingresar el Factor de Población.		59

Categoría de Consecuencias en Salud		
Paso1. Sumas las líneas 53, 54 y 59. Este es el Factor de Consecuencias en salud		60
Paso 2. El Factor de Consecuencias en Salud (línea 60) es la equivalencia en la Categoría de Consecuencias en Salud, como el siguiente:		
Factor de Consecuencias en Salud	Categoría de Consecuencias en Salud	
<10	A	
10 - 19	B	
20 - 29	C	
30 - 39	D	
> 40	E	
Ingresar la Categoría de Consecuencias en Salud		61

Categoría de Consecuencias.	
Escoger la letra más alta de las líneas 50 o 61 (A es baja, E es alta). Este es el valor de la Categoría de Consecuencias.	

TÍTULO
“IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE INSPECCIÓN BASADA EN RIESGO EN ANÁLISIS CUALITATIVO PARA EQUIPOS ESTÁTICOS DEL ÁREA DE FIBRA, CELULOSA ARAUCO - PLANTA ARAUCO”
Nombre Memorista: Joaquín Andrés Arduiz Gacitúa

Modalidad	Presencial	Profesor(es) Patrocinante(s)
Concepto		Dr. Juan Pablo Sanhueza Araya Dr. Felipe Sanhueza Gómez
Calificación		
Fecha	08-01-2024	

	Ingeniero Supervisor Sr. Alain Sanhueza
	Institución Celulosa Arauco y Constitución

Comisión (Nombre y Firma)	
Dr. Nicolás Araya R.	

RESUMEN
<p>Esta tesis se centra en la implementación de la metodología de Inspección Basada en Riesgo (RBI), específicamente mediante un análisis cualitativo, aplicado a 11 equipos estáticos en la industria de la celulosa, particularmente en la empresa Arauco. Estos equipos, que forman parte integral del área de fibra de la planta, son esenciales en el proceso de producción de celulosa y requieren de un mantenimiento y una evaluación de riesgos meticulosos para asegurar la continuidad operativa y la seguridad.</p> <p>El estudio adopta la metodología de RBI según las normas API 580 y 581, con el objetivo de establecer una jerarquía de riesgos que permita optimizar recursos y</p>

mejorar la confiabilidad de los equipos. Se evaluó la probabilidad de fallo (PoF) y la consecuencia de fallo (CoF) de cada equipo, utilizando datos de inspecciones previas, historiales de mantenimiento y especificaciones técnicas para identificar y clasificar los mecanismos de deterioro potenciales, como la corrosión, la fatiga y la acumulación de material cristalizado.

A través de la aplicación de esta metodología cualitativa, se ha logrado una visión clara del estado actual de los equipos y se han identificado aquellos con el mayor riesgo. Esta información es crucial para dirigir los esfuerzos de mantenimiento hacia los equipos más críticos y para la toma de decisiones estratégicas con respecto a las operaciones de la planta, además de contar con la jerarquización de los equipos, para la planificación de futuras PGP (parada general de planta).