

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**  
**VALPARAÍSO – CHILE**



**“APORTE PARA EL DISEÑO DE MODELO DE  
REINGENIERÍA PARA EL DESARROLLO DE  
PLANES MATRICES DE MANTENIMIENTO  
PARA PLANTA DE ÁCIDO DE EMPRESA  
MINERA”**

**VLADIMIR NICOLÁS GÓMEZ VALDEBENITO**

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO MENCIÓN ENERGÍA**

**PROFESOR GUÍA: DR. PEDRO SARIEGO PASTÉN**

**PROFESOR CORREFERENTE: ING. RENÉ VALDENEGRO OYANEDER**

**ABRIL 2017**



## **Advertencia**

Material de referencia, su uso no involucra responsabilidad del autor o de la Institución



## **Agradecimientos**

Se agradece encarecidamente a Ingeniería de Mantenimiento de Codelco Ventanas por brindarme la oportunidad de desarrollar mi trabajo de título en la División.

A todas las personas pertenecientes a la división por darse el tiempo de resolver todas y cada una de las dudas que se presentaron a lo largo del desarrollo, por enseñarme todo lo necesario para poder realizar el trabajo correctamente y para completar mi formación como ingeniero, por todos y cada uno de los consejos que me brindaron.

Agradezco profundamente a mis amigos por la amistad brindada a lo largo de estos años y por la ayuda que me entregaron en cada momento que lo necesité.

Finalmente, a todos quienes me brindaron su ayuda a lo largo de estos años para poder llegar a obtener mis metas.



## **Dedicatoria**

Este trabajo está dedicado principalmente a mi madre Beatriz por todos y cada uno de los sacrificios que hizo con el fin de que pudiera cumplir mis metas, por su apoyo y sus consejos a lo largo de mi vida.

Se dedica también a toda mi familia quienes siempre me apoyaron y se alegraban por cada uno de los logros conseguidos como si fueran propios.

También y muy especialmente a mi abuelo quien partió a mitad de mi vida universitaria, por todos los consejos que me dio, por los momentos que compartimos mientras estuvo a mi lado.



## **Resumen**

En el presente trabajo se presenta el resultado del desarrollo del tema “Aporte para el diseño de modelo de reingeniería para el desarrollo de planes de mantenimiento para la planta de ácido de empresa minera” aplicado a la Planta de Ácido de la División Ventanas de Codelco, cuyo resultado es una propuesta de plan de mantenimiento para los equipos de esta.

Para el correcto desarrollo del tema el primer paso es hacer un levantamiento con la información existente acerca de las fallas que se presentaron en la planta de ácido el año 2015, de los planes matrices actuales entre otros.

El segundo paso es realizar un análisis de criticidad para los equipos presentes en la Planta de Ácido con el fin de determinar cuáles son los equipos críticos, esto se hace considerando la mantenibilidad, impacto en el proceso, impacto medioambiental, seguridad y probabilidad de falla de cada uno de los equipos existentes en la planta.

Una vez que se han definido los equipos principales de la Planta de Ácido se le realiza a cada uno de ellos un análisis de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM), para determinar las acciones que se deben realizar a cada uno de los respectivos equipos para luego contrastar cuales de estos están presentes en los planes matrices existentes en la planta para realizar un reporte de las acciones a implementar en los equipos críticos.

Como resultado del proceso descrito se determina que la mayoría de los modos de falla más frecuentes están cubiertos por el plan matriz presente en la planta, sin embargo, a lo largo del presente trabajo se detectan modos de falla menos frecuentes y que tienen un mayor impacto en las operaciones y en el medio ambiente que no se encuentran cubiertos por lo que se deben incluir a la brevedad posible, para cumplir esto se presentan propuestas de acciones para resguardar las posibles fallas que se pueden presentar por los modos de falla.



## **Abstract**

In this paper the result of the development of the theme "Aporte para el diseño de modelo de reingeniería para el desarrollo de planes de mantenimiento para la planta de ácido de empresa minera" applied to the acid plant Codelco's Ventanas Division is presented, the result is a proposed maintenance plan for this equipment.

For proper development of the subject the first step is to make a survey with existing information about failures that occurred in the acid plant by 2015 from the current matrices plantes among others.

The second step is to perform an analysis of criticality for teams in the acid plant in order to identify critical equipment are, this is done by considering the maintainability, impact on the process, environmental impact, safety and probability of failure each of the existing equipment in the plant.

Once defined the main equipment of the plant acid is performed in each analysis reliability centered maintenance (RCM) to determine the actions to be performed at each of the respective teams then contrast which of these are present in the existing plant matrices plans to make a report of the actions to implement in critical equipment.

As a result of the described process it determines that most of the most frequent failure modes are covered by the matrix plan present in the plant, nevertheless, throughout the present work are detected less frequent failure modes and that have a greater impact In the operations and in the environment that are not covered by what should be included as soon as possible, in order to comply with this, proposals for actions are presented to protect the possible failures that can be presented by the failure modes.



## **Glosario**

RCM: Mantenimiento basado en confiabilidad

TPM: Mantenimiento basado en riesgo

Cu: Cobre

CT: Convertidor Teniente

CPS: Convertidor Pierce Smith

Ánodo de Cobre: Plancha de cobre con 99,7% de pureza

Cátodo de Cobre: Plancha de cobre con 99,99% de pureza



# Índice

Introducción.....	12
Objetivos.....	13
Marco Teórico .....	14
Ingeniería y Gestión del Mantenimiento .....	14
Tipos de Mantenimiento.....	15
Mantenimiento Basado en Confiabilidad .....	16
Siete preguntas básicas .....	17
Análisis Modal de Fallas y Efectos .....	20
Proceso de selección de tareas.....	20
Aplicación del Proceso .....	21
Herramientas.....	23
Beneficios de RCM .....	29
Análisis de Criticidad .....	32
Contexto .....	34
Proceso Planta de Ácido.....	35
Captación y Limpieza de Gases .....	35
Lavado de Gases.....	36
Secado de Gases .....	36
Conversión de SO <sub>2</sub> .....	37
Absorción de SO <sub>3</sub> .....	37
Enfriamiento de agua.....	38
Sistema de tratamiento de Riles .....	38
Gestión del Mantenimiento .....	39
Situación Actual .....	43
Modelo.....	45
Selección de Equipo y/o Planta .....	46
Análisis de Criticidad .....	47
Resultados definición de Criticidad.....	55
Descripción Equipos Críticos .....	58
Aplicación de RCM.....	60



---

Recopilación de Información .....	60
Costo de Ineficiencia .....	61
Análisis de Información .....	61
Sistema Bomba P1 .....	64
Sistema Bomba P4.....	66
Sistema Bomba P6.....	68
Sistema Bomba P70.....	70
Sistema Bomba P5.....	72
Bomba P58 .....	74
Bomba P5N .....	76
Intercambiador W24.....	78
Análisis de Resultados.....	80
Recomendaciones .....	82
Conclusiones.....	83
Bibliografía.....	84

## **Índice de Figuras**

Figura 1: Ciclo de Trabajo del Mantenimiento (Pablo Viveros, 2012).....	14
Figura 2: Grupo de revisión.....	22
Figura 3:Hoja de Información Estándar .....	24
Figura 4: Diagrama de decisión, primera parte .....	25
Figura 5: Diagrama de decisión, segunda parte.....	26
Figura 6: Hoja de decisión estándar .....	27
Figura 7: Diagrama explicativo del registro de las consecuencias de falla den la Hoja de Decisión.....	29
Figura 8: Matriz de criticidad estándar (Pablo Viveros, 2012) .....	33
Figura 9: Esquema productivo Codelco División Ventanas.....	34
Figura 10: Diagrama EMS, Captación y limpieza de gases .....	36
Figura 11: Diagrama EMS, Lavado de Gases .....	36
Figura 12: Diagrama EMS, Secado de Gases.....	37



---

Figura 13: Diagrama EMS, Conversión de SO <sub>2</sub> .....	37
Figura 14: Diagrama EMS, Absorción de SO <sub>3</sub> .....	38
Figura 15: Diagrama EMS, Enfriamiento de agua .....	38
Figura 16: Esquema general de Planta de Ácido.....	39
Figura 17: Diagrama funcionamiento Trabajos en plataforma SAP .....	42
Figura 18: Algoritmo aplicado para la definición de criticidad .....	47
Figura 19: Análisis FODA de metodología para definir criticidad .....	55

## **Índice de Tablas**

Tabla 1: Consecuencias de falla en hoja de decisión .....	28
Tabla 2: Capacidad anual procesos, Codelco División Ventanas .....	34
Tabla 3: Precio del Cobre 2011 a 2016 .....	43
Tabla 4: Aportes de Codelco al Estado de Chile, 2011-2016.....	43
Tabla 5: Desglose criterios análisis de criticidad .....	48
Tabla 6: Niveles de probabilidad de falla.....	49
Tabla 7: Niveles de Impacto en producción .....	50
Tabla 8: Niveles de mantenibilidad.....	51
Tabla 9: Niveles de Seguridad.....	52
Tabla 10: Niveles impacto al medio ambiente .....	53
Tabla 11: Calculo para definir límites de criticidad .....	54
Tabla 12, Niveles de Criticidad .....	54
Tabla 13: Resultados Análisis de Criticidad .....	55
Tabla 14: Desglose Análisis de Criticidad .....	55
Tabla 15: Equipos críticos análisis de criticidad .....	57
Tabla 16: Datos costo de ineficiencia.....	61
Tabla 17: Factores de severidad (Diputación Foral de Bizcaia).....	62
Tabla 18: Factores de Probabilidad de Falla (Diputación Foral de Bizcaia).....	62
Tabla 19: Factores de Detección (Diputación Foral de Bizcaia).....	63
Tabla 20: Hoja de información sistema bomba P1 .....	64



---

Tabla 21: Hoja de decisión Bomba P1 .....	65
Tabla 22: Hoja de Información Bomba P4.....	66
Tabla 23: Hoja de Información Sistema Bomba P4 .....	67
Tabla 24: Hoja de Información Sistema Bomba P6 .....	68
Tabla 25: Hoja de Decisión Sistema Bomba P6.....	69
Tabla 26: Hoja de Información Sistema Bomba P70 .....	70
Tabla 27: Hoja de decisión Sistema Bomba P70.....	71
Tabla 28: Hoja de Información Sistema Bomba P5 .....	72
Tabla 29: Hoja de decisión Bomba P5 .....	73
Tabla 30: Hoja de Información Bomba P58.....	74
Tabla 31: Hoja de decisión Bomba P58 .....	75
Tabla 32: Hoja de Información Bomba P5N.....	76
Tabla 33: Hoja de decisión Bomba P5N .....	77
Tabla 34: Hoja de Información Intercambiador de Calor W24.....	78
Tabla 35: Hoja de Decisión Intercambiador de Calor W24 .....	79
Tabla 36: Acciones faltantes con índices mayores a 5 .....	80
Tabla 37: Acciones existentes y faltantes por equipo .....	81

## **Índice de Gráficos**

Gráfico 1: Diagrama de Pareto de Equipos Críticos .....	56
Gráfico 2: Distribución porcentual de acciones existentes y faltantes .....	80



## Introducción

En el contexto actual de la industria de la minería del cobre afectada fuertemente por los bajos precios del cobre, una buena gestión de mantenimiento resulta fundamental para que la industria se mantenga competitiva en el mercado.

Dentro de la industria mencionada un requisito básico para su correcto funcionamiento es el respeto por el entorno y el medioambiente, siendo esto resguardado y regulado por la normativa ambiental vigente por lo que se debe velar por su cumplimiento a cabalidad tanto desde las operaciones como desde las mantenciones realizadas

En la División Ventanas de Codelco se encuentran los procesos de fundición y de refinación, pero para el desarrollo del presente trabajo se toma como base el cumplimiento de la normativa por parte de la fundición a través de la Planta de Ácido de la división y será en esta planta donde se desarrolla el trabajo propiamente tal.

La Planta de Ácido de la División recibe los gases que se generan producto del proceso de fundición con el fin de que los gases emitidos a la atmósfera cumplan con la normativa ambiental vigente y se esa manera se resguarde la integridad tanto del medio ambiente como del entorno de la división, por lo que su correcta mantención resulta fundamental para el funcionamiento de la División en su conjunto.

El desarrollo de este trabajo consta de dos partes, en primer lugar, se utiliza el enfoque de RBM para definir cuáles son los equipos más críticos de la planta, luego se desarrolla un mantenimiento basado en confiabilidad para determinar cuáles son las acciones necesarias a llevar a cabo en cada uno estos.

Para la definición de los equipos a estudiar se utiliza la lista de equipos con la que cuenta la división en la plataforma de SAP.

Considerando que el alcance de este trabajo abarca toda la planta de ácido y el enfoque de los análisis presentados es del tipo cualitativo.



## Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es aportar para el diseño de modelo de reingeniería de planes matrices de mantenimiento para el desarrollo de planes de Planta de Ácido de empresa minera Codelco División Ventanas, ubicada en la Región de Valparaíso. El resultado será una pre propuesta que sirva de base para la elaboración del modelo del mantenimiento en comento en los ámbitos de interés.

Los objetivos específicos que se estableces para obtener la meta señalada son:

- Análisis de alrededores, contexto, entorno, indicadores de la planta de ácido, planes matrices actuales.
- Análisis de funcionalidad de la planta de ácido, cumplimiento de normativas vigentes y futuras, especialmente medio ambientales y de responsabilidad social entre otros, especificación de plan de negocios caso base y pronosticado, entre otros.
- Análisis de criticidad de procesos y equipos planta de ácido. Definición de procesos y equipos críticos para el fiel cumplimiento del conjunto de normativas ambientales y de responsabilidad social.

## Marco Teórico

### Ingeniería y Gestión del Mantenimiento

Primeramente, se debe definir el concepto de mantenimiento, mantenimiento es “Asegurar que los activos físicos continúen haciendo lo que sus usuarios quieren que hagan” (Moubray, 1991)

La base de la ingeniería de mantenimiento es la mejora continua del proceso de gestión del mantenimiento a través de conocimientos, análisis entre otros que se utilicen para una buena toma de decisiones cuyo fin sea favorecer los resultados tanto económico como de operación global

La ingeniería de mantenimiento, en base a la información de los resultados obtenidos en la ejecución de las tareas de mantención, permite a los ingenieros la actualización continua y justificada de:

- La estrategia de mantenimiento
- Programación de Actividades
- Selección de nuevos equipos con un bajo costo global

La gestión del mantenimiento no es una unidad independiente dentro de una organización, sino que es dependiente de factores tanto internos como externos en una organización, esto se puede graficar a través del ciclo de trabajo del mantenimiento.

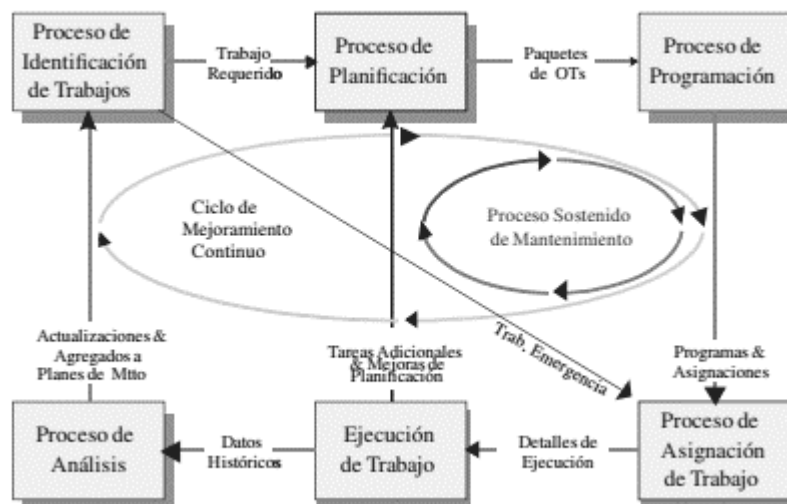


Figura 1: Ciclo de Trabajo del Mantenimiento (Pablo Viveros, 2012)

Del diagrama se puede notar claramente cuáles son los aspectos que influyen al momento de realizar la planificación del mantenimiento y que se deben tener en consideración para la elaboración de un modelo. Del ciclo de trabajo se pueden diferenciar dos zonas muy marcadas, a la derecha se encuentra el ciclo habitual del mantenimiento (Proceso sostenido del mantenimiento) que explica las actividades habituales del mantenimiento como son:

- Planificación
- Programación
- Asignación de Tareas
- Ejecución de Tareas

Mientras que la otra zona del diagrama se distinguen dos actividades más:

- Proceso de análisis
- Proceso de identificación

La ejecución de estos dos procesos al ciclo de mantenimiento abre una importante ventana a la mejora de las actividades de mantenimiento dentro de la organización y deben ser considerados para la elaboración de un modelo de mantenimiento, el cual debe ser eficaz eficiente y oportuno, es decir debe ser concordante con las necesidades que presente la empresa donde será implementado, debe ser capaz de operar, producir y lograr los objetivos minimizando los costos.

## **Tipos de Mantenimiento**

Existen distintos tipos de mantenimiento, los cuales se dividen en mantenimiento preventivo, correctivo, predictivo y productivo.

### **Mantenimiento Preventivo**

El mantenimiento preventivo corresponde a las actividades que se llevan a cabo antes de que un equipo presente una falla, reduciendo la probabilidad de que falle. Este tipo de mantenimiento se puede definir como las actividades que se realizan con el fin de prevenir las fallas. En el mantenimiento programado se engloban todas las acciones que se realizan con el fin de prevenir las fallas y de detectar las fallas antes de que se presenten

Dentro del mantenimiento preventivo se distinguen dos tipos de mantenimiento:

- **Mantenimiento Preventivo a fecha constante:** Se refiere a las tareas que se realizan a una frecuencia predefinida. En este tipo de mantenimiento no es de importancia lo que ocurra entre una intervención y otra.
- **Mantenimiento Preventivo a edad constante:** Se refiere a las intervenciones que se realizan cada cierto parámetro de uso, por ejemplo, cada cierta cantidad de horas, kilómetros, combustible quemado, etc.

## **Mantenimiento Correctivo**

El mantenimiento correctivo se refiere a la sustitución de elementos por falla, se divide en dos categorías:

- **No planificado:** Se refiere al mantenimiento que se realiza para atender emergencia. Se debe efectuar de manera urgente considerando que se trata de atender una falla.
- **Planificado:** Es aquel que se sabe de manera anticipada que existe una alta probabilidad de que se presenta una falla y en consideración eso se tiene conocimiento de las acciones a llevar a cabo, por lo que se realiza una vez que se tengas los recursos disponibles.

## **Mantenimiento Predictivo**

Se refiere a la sustitución de elementos tras síntoma. El mantenimiento predictivo es una técnica que pronostica el momento de la falla de un equipo a través de diversos sistemas de monitoreo como medición de vibraciones, tintas penetrantes entre otros.

## **Mantenimiento Productivo**

Corresponde a las acciones de carácter preventivo junto con las de mejoramiento continuo, están dirigidas a no solo a mantener un equipo, sino que a mejorar su funcionamiento y operación.

## **Mantenimiento Basado en Confiabilidad**

El mantenimiento basado en confiabilidad (RCM) es una filosofía de mantenimiento que define las acciones a seguir considerando principalmente las consecuencias de las fallas de cada uno de los equipos a los cuales se aplica RCM considerando el contexto operacional en el cual está inmerso. RCM se define como “Un proceso que se usa para determinar los requerimientos del mantenimiento de los elementos físicos en su contexto operacional” (Moubray, 1991)

RCM tiene como eje principal la relación entre la organización y los activos físicos que están presentes en esta, por lo que la existencia de un registro de dichos activos es un requisito fundamental para la aplicación de RCM, en el caso de que no exista un registro este debe elaborarse.

La aplicación correcta del método permite que las organizaciones identifiquen estrategias efectivas de mantenimiento que permitan el cumplimiento de los estándares de cada proceso y de esa forma maximizar la rentabilidad de los activos

## **Siete preguntas básicas**

La aplicación del mantenimiento centrado en confiabilidad de basa en 7 preguntas básicas referidas al o los activos a los cuales se le aplicara RCM.

- ¿Cuáles son las funciones?
- ¿De qué forma puede fallar?
- ¿Qué causa que falle?
- ¿Qué sucede cuando falla?
- ¿Qué ocurre si falla?
- ¿Qué se puede hacer para prevenir las fallas?
- ¿Qué sucede si no puede prevenirse la falla?

A continuación, se presenta una pequeña reseña de cada una de las preguntas.

### **¿Cuáles son las funciones?**

Se refiere a la función por la cual el activo fue adquirido por la organización y que si esta se pierde total o parcialmente afecta negativamente las operaciones. Se deben tener claramente definidos los estándares de funcionamiento de los equipos, junto con esto dichos estándares de hacen extensivos a la calidad del producto, servicio al cliente, problemas del medio ambiente, coste operacional y seguridad. Las funciones se pueden clasificar en:

- Funciones Primarias: Son las razones por las cuales el activo es adquirido por la organización, por lo que es una función de fácil identificación
- Funciones Secundarias: Son funciones que cumple el activo, que si bien, no son para las que fue adquirido pueden resultar ser de vital importancia y una falla en una de ellas puede traer graves consecuencias. En esta categoría caen por lo general funciones relacionadas con ecología, seguridad, economía, etc.

### **¿De qué forma puede fallar?**

Se refiere a las fallas funcionales que puede presentar un equipo, una falla funcional se define como “La incapacidad de un elemento o componente de un equipo para satisfacer un estándar de funcionamiento deseado” (Moubray, 1991).

Como se mencionó anteriormente un activo tiene más de una función, por lo que se debe definir una falla en relación a una función específica y no con la falla de todas las funciones de un equipo.

### **¿Qué causa que falle?**

Esta pregunta apunta a identificar los modos de falla que tienen una mayor probabilidad de presentarse en un determinado equipo y provocar una pérdida de función. un modo de falla es cualquier tipo de evento que pueda causar una falla funcional. Esta pregunta

permite identificar cual es el origen de las fallas más probables entregando una idea más clara de lo que se desea prevenir. Los modos de falla se clasifican en:

- Capacidad bajo el funcionamiento deseado: Se refiere a las fallas que disminuyen la capacidad de trabajo de un equipo. En esta categoría caen modos de falla como deterioro, fallas de lubricación, suciedad.
- Capacidad por sobre el funcionamiento deseado: El funcionamiento aumenta a tal punto que el activo ya no puede responder, ya que el aumento de esfuerzo hace que se vuelva poco fiable.

### **¿Qué sucede cuando falla?**

Esta pregunta se refiere a indicar que pasa cuando se produce un determinado modo de falla, es decir, los efectos de la falla. Al analizar un efecto de falla se debe incluir la información que se considere necesaria para la evaluación de la consecuencia de las fallas, entre las que se consideran:

- La evidencia de que se produjo la falla
- La forma en la que una falla puede ser una amenaza para la seguridad y/o medioambiente, además de la operación normal.
- Que se debe hacer para la reparación de la falla.

### **¿Qué ocurre si falla?**

Esta pregunta indica cómo y cuánto importa cada falla, esto se hace considerando las consecuencias de este. Los se clasifican por categorías y es según la categoría es que tipo de mantenimiento se debe realizar.

- **Consecuencias de las fallas no evidentes:** Las fallas no evidentes son los que no tienen un impacto directo en la organización, pero su efecto es que exponen a la existencia de otro tipo de fallas que a menudo tienen consecuencias catastróficas.
- **Consecuencias en la seguridad y el medio ambiente:** Una falla se considera que tiene consecuencias en la seguridad si pudiese herir o matar a alguien, mientras que tiene consecuencia en el medio ambiente si llegara a violar la normativa ambiental vigente.
- **Consecuencias operacionales:** Se dice que una falla tiene consecuencia operacional si puede afectar la producción, esto no se refiere únicamente a una detención de producción, también abarca la calidad del servicio o producto, atención al cliente.
- **Consecuencias no operacionales:** Estas fallas no afectan ni a la producción, seguridad o al medio ambiente, por lo que solo se incurre en el gasto de su reparación.

Como se demostrará a lo largo del desarrollo del presente trabajo, el proceso RCM se basa en cada una de las categorías mencionadas para el proceso de toma de decisiones, esto obliga a llevar a cabo un reconocimiento riguroso de cada una de las consecuencias con el fin de que estén bien asociadas a las categorías anteriormente descritas. El reconocimiento mencionado se torna necesario debido a que RCM ubica a la seguridad y al medioambiente como una prioridad en la administración del mantenimiento.

Este proceso cambia la percepción de que todas las fallas deben ser obligatoriamente prevenidas, esta visión es reemplazada por priorizar las actividades que tienen un más grande impacto por las que tienen un bajo impacto. Esto guía las posibles técnicas por las cuales se pueden prevenir las fallas, estas técnicas se dividen en:

- **Tareas Proactivas:** Este tipo de tareas se refieren a las que se llevan a cabo antes de que se presente la falla. En esta categoría se consideran los tipos de mantenimiento conocidos como predictivo y preventivo, tratándose en términos de mantenimiento centrado en confiabilidad como “reacondicionamiento cíclico”, “sustitución cíclica” el mantenimiento preventivo, mientras que el predictivo se trata como “mantenimiento a condición”.
- **Acciones a falta de:** Estas acciones se tratan en la situación de que el equipo falle y se utilizan cuando no es posible determinar una tarea proactiva que sea efectiva. Dentro de esta categoría se consideran acciones como “búsqueda de falla”, “rediseño”, “mantenimiento a rotura”.

### **¿Qué se puede hacer para prevenir las fallas?**

Los estudios acerca del comportamiento de las fallas han determinado que hay una conexión entre la confiabilidad y la edad operacional de los equipos, teniendo esto como resultado que se crea erróneamente que mientras más intervenciones tenga un equipo menos fallas presentará. Esto es un error debido a que en la mayoría de los casos los equipos no tienen un modo de fallas predominante relacionado con la edad, ya que los límites de la edad de un equipo o componente tienen una baja influencia en la mejora de la confiabilidad, es importante mencionar que si se aumenta la cantidad de intervenciones lo más probable es que aumente la frecuencia de las fallas teniendo un aumento de costos tanto por las intervenciones como por las reparaciones y por lo que se deja de producir.

Debido a los argumentos presentados es que para los equipos más importantes se destinan principalmente las tareas proactivas.

- **Tareas cíclicas “a condición”:** Son las técnicas que determinan cuando va a fallar un equipo, se refiere a las tareas preventivas.

- **Tareas de reacondicionamiento cíclico:** Refabricar un componente o repararlo antes de un límite de edad específico sin importar la condición en la que se encuentre en el momento de la ejecución de la tarea.
- **Tareas a condición:** Son tareas orientadas en detectar las condiciones que indican que una falla funcional está por presentarse. Se le llama a condición porque los componentes se dejan en servicio a condición de que sigan funcionando con los parámetros óptimos.

### **¿Qué sucede si no puede prevenirse la falla?**

Junto con la determinación de la factibilidad técnica de una determinada acción, la decisión de si vale o no la pena llevarla a cabo pasa por cómo se reaccione a una falla. Al plantear esto RCM une la evaluación tanto de la consecuencia como de la selección de una tarea. La selección de una tarea se basa en los siguientes criterios.

- **Tarea de búsqueda de fallas:** Las tareas de búsqueda de fallas se utilizan cuando no es posible encontrar una acción para prevenir la falla de una función no evidente.
- **Rediseño:** Se debe rediseñar si no es posible prevenir una falla con consecuencias a la seguridad y al medioambiente.
- **No mantenimiento preventivo programado:** Se refiere a dejar funcionando a la falla los equipos, esto solo se presenta si la falla del equipo tiene solo consecuencias operacionales y si a su vez económicamente la intervención es más económica que las consecuencias operacionales.

### **Análisis Modal de Fallas y Efectos**

El análisis Modal de Fallas y Efectos (AMFE) es la herramienta más importante que contempla el mantenimiento centrado en confiabilidad ya que permite dar respuesta a las primeras preguntas del RCM, esto permite asegurar que se han considerado a lo largo del proceso de aplicación todas las fallas potencialmente posibles.

La importancia del AMFE radica en que los grupos de revisión, a través de este consideran parámetros indispensables como lo son la detección (D), gravedad o severidad (S) y probabilidad de falla (F) de manera cuantificable identificando claramente el impacto de las fallas a través del Número de Prioridad de Riesgo (NPR).

$$NPR = G \cdot S \cdot F$$

### **Proceso de selección de tareas**

RCM entrega una serie de criterios para determinar si una tarea es técnicamente factible o no, se dice que “Una tarea es técnicamente factible si físicamente permite reducir o realizar una acción que reduzca las consecuencias del modo de falla, a un nivel que sea aceptable al dueño o usuario del activo” (Moubray, 1991).

Si una tarea proactiva es técnicamente factible pasa por las características de la tarea y de la falla que se desea evitar, de no encontrarse una tarea preventiva apropiada de debe seguir una tarea “a falta de”. A continuación, se explica el detalle del proceso:

**Fallas Ocultas:** Una tarea proactiva es técnicamente factible si reduce de manera considerable el riesgo de falla múltiple asociado a la función que se busca resguardar. Si no se encuentra una tarea proactiva adecuada se debe usar una tarea de “búsqueda de fallas” y como una última alternativa una tarea “a falta de”.

**Fallas con consecuencias ambientales y de seguridad:** Una tarea proactiva vale la pena si la posibilidad de que se presente la falla baja de manera considerable o derechamente se elimina. Si por algún motivo no se puede determinar una tarea proactiva apropiada se debe proceder a rediseñar el componente o a cambiar el proceso.

**Falla con consecuencias operacionales:** Una tarea proactiva vale la pena “si el costo total de realizarla a lo largo de un cierto periodo de tiempo es menor al de las consecuencias operacionales más el costo de la reparación en el mismo período de tiempo” (Moubray, 1991). Si se presenta esta situación la acción a seguir es “ningún mantenimiento programado” en caso de que aun así el nivel de riesgo es inaceptable se debe proceder al rediseño.

**Falla sin consecuencias operacionales:** Solo vale la pena una tarea proactiva “Si el costo de la tarea a lo largo de un período de tiempo es menor al costo de reparación en el mismo tiempo”. Al igual que en el caso anterior si no se determina una tarea proactiva se debe emplear la acción “ningún mantenimiento programado” y en caso de que aún se presente un alto índice de riesgo se debe proceder al rediseño.

## **Aplicación del Proceso**

Antes que comenzar a aplicar el proceso de aplicación de RCM es necesario una toma de decisiones referente a que equipos se someterá al proceso de análisis, por muy básico que parezca este proceso es una consideración fundamental que debe estar alineada con los recursos y los intereses de la organización que posee los activos analizar. Un requisito básico para poder aplicar el proceso es la existencia de un registro de la planta, debiendo crearse uno si no se cuenta al momento de querer iniciar el proceso de RCM.

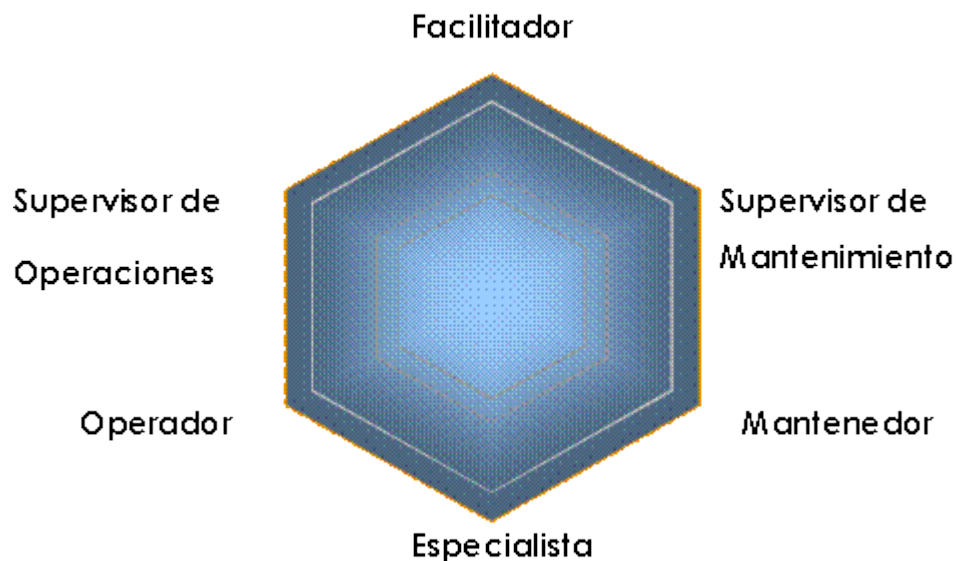
Si el proceso de mantenimiento centrado en confiabilidad es aplicado de manera correcta se pueden lograr valiosos avances en la efectividad y eficiencia del mantenimiento siendo un excelente método para agregar valor a la organización en la cual se está aplicando. Para que esto se logre se debe realizar un planeamiento riguroso y una adecuada planeación, el planeamiento se describe de manera general a continuación.

- Definir cuáles son los activos físicos que se podrían beneficiar de mejor manera del proceso RCM y como se traduciría este beneficio.

- Determinar que recursos se requieren para poder llevar a cabo el proceso de mantenimiento centrado en confiabilidad en los activos que se han determinado en el punto anterior.
- Si se ha determinado que existen equipos en los que los beneficios superen la inversión, se debe decir de manera rigurosa el equipo que estará a cargo de proceso, decidiendo a los responsables de la realización, de las auditorías respectivas, de cuando y donde se llevará a cabo lo anterior, además de coordinar la capacitación de las personas involucradas.
- Asegurar que en contexto del o los activos esté claramente determinado.

### **Grupos de Revisión**

Debido a la diversidad que se presenta en las siete preguntas básicas de RCM resulta lógico que no se pueden responder por una sola persona, la correcta aplicación del mantenimiento centrado en confiabilidad pasa en gran parte por el equipo a cargo, este no debe estar conformado solamente por personal de mantenimiento, debe ser compuesto mínimamente por un mantenedor y un operador del o los equipos implicados, cabe destacar que los miembros del equipo deben tener conocimiento de RCM.



*Figura 2: Grupo de revisión*

**Facilitadores:** Son los encargados de efectuar la revisión constante del trabajo efectuado. Deben velar por la correcta aplicación del RCM, que no se ignoren

componentes de los equipos y procurar que los grupos de revisión lleguen a consensos. Entre sus funciones destacan velar por que:

- El análisis se lleve a cabo en el nivel de detalle definido, que los límites del sistema estén debidamente claros y que junto en base a esto ningún componente sea pasado por alto.
- El mantenimiento centrado en confiabilidad sea debidamente entendido y ejecutado por el grupo de revisión.
- El grupo llegue a consenso en forma rápida y ordenada en los tiempos determinados.
- El análisis progrese de manera razonable y que cumpla con los plazos establecidos.

### **Resultados de un análisis RCM**

Los resultados esperables si el proceso de mantenimiento centrado en confiabilidad se ejecuta de manera correcta son:

- Planes de mantenimiento a realizar.
- Procedimientos de operación revisados.
- Lista de cambios a realizar, esta se puede referir al diseño del activo, a la forma de operar en caso de que no pueda cumplir la función deseada con la configuración presente.

### **Auditoría e Implementación**

Es el personal gerente que tiene la responsabilidad sobre la planta, debe velar por que el proceso se haya hecho correctamente y debe estar de acuerdo con los resultados obtenidos.

### **Herramientas**

Para la correcta aplicación del mantenimiento centrado en confiabilidad se utilizan las herramientas que RCM incorpora.

### **Hoja de Información**

La hoja de información RCM es una planilla en la cual se ordenan las respuestas a las primeras 4 preguntas la confiabilidad, esta planilla permite estudiar de manera ordenada cada uno de los modos de falla, efectos, consecuencias de los equipos estudiados con el fin de realizar una toma de decisiones adecuada centrada en los modos de fallas más importantes.

Función o Componente del Servicio		Fallo Funcional		Modo de Fallo	Efectos de los Fallos	Consecuencia de los Fallos
1	Función se encargan de bombear la solución de ácido a la torre de catalisis K3	1	Pérdida de Función	Desalineamiento	Daño de acoplamiento con motor	<p><b>Operacional:</b> Detiene el proceso en caso de presentar vibraciones sobre los límites permitidos, afectando la operación</p> <p><b>Medioambiental:</b> emitiendo gases por la detención de fundición</p>
				Rotura de Rodete	Imposibilidad de continuar conoperación normal de la bomba	<p><b>Operacional:</b> Detención inmediata del equipo en caso de que la bomba de respaldo no esté en condiciones optimas,</p> <p><b>Medioambiental:</b> emitiendo gases por la detención de la fundición</p>
				Rotura Sello Mecánico	Fugas de ácido	Posibles daños a personas por la posibilidad de entrar en contacto con ácido, también implica detención de la planta
		2	Caudal Insuficiente	Soltura	Desgaste excesivo de cojinetes, exceso de vibración	Permite el paso de humedad excesiva al proceso afectando los filtros vela y por lo tanto aumentando la presión del circuito, esto implica que de deja de operar el ventilados V10 lo que implica una detención inmediata de la planta de ácido y por lo tanto también de la fundición
				Abrasión	Desgaste progresivo en impulsor	<b>Operacional:</b> Disminución de caudal, baja eficiencia
				Condiciones de carga fuera de diseño	Desgaste progresivo en equipo pudiendo generar fallas poco detectables	Consecuencia no evidente: deriva en posibles fallos futuros por otras causas
				Desgaste	Deterioro progresivo de componentes de la bomba	Consecuencia no evidente: deriva en posibles fallos futuros por otras causas

Figura 3:Hoja de Información Estándar

## Hoja y Diagrama de Decisión

El diagrama de decisión es una herramienta que permita integrar todos los procesos de decisión en una estrategia única, poniendo siempre por delante la integridad de las





Figura 5: Diagrama de decisión, segunda parte

Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Intervalo Inicial	A realizarse por
										H4	H5	S4			
F	FF	MF	H	S	E	O									
1	1	A	S	N	N	S	S						Tarea programada con sistema en condición		
1	1	B	S	N	N	S	N	N	S				Tarea de descarte programado: Se recomienda el descarte programado del rodete de la bomba	Anual	
1	1	C	S	S			N	S					Tarea de restauración programada: Hoja de ruta del plan no específica en particular el sello mecánico por lo que se recomienda especificar este punto y determinar la frecuencia de cambio utilizando como referencia la entregada por el fabricante.		
1	2	A	S	N	S		S						Tarea programada con sistema en condición		
1	2	B	S	N	N	S	N	N	S				Tarea de sustitución programada: Se recomienda complementar la tarea de sustitución programada con una inspección al momento del desarme de la bomba para su respectiva mantención, esto considerando que la abrasión además de ser un modo de falla es una condición intrínseca de una bomba	Anual	
1	2	D	N				N	S					Tarea de restauración programada		

*Figura 6: Hoja de decisión estándar*

La hoja de decisión se compone de dieciséis columnas, las columnas F (Función), FF (Falla Funcional) y MF (Modo de Falla) se utilizan para identificar cual es el modo de falla que se está analizando, estas se usan para correlacionar las referencias de las hojas de información y decisión.

El resto de las preguntas se usan para registrar las respuestas obtenidas del diagrama de decisión RCM presentado anteriormente.

- Las columnas tituladas H, S, E, O y N se usan para las respuestas referidas a las consecuencias de cada modo de falla.
- Las columnas tituladas con H1, H2, H3 registran se usan para las tareas proactivas, determinando que tipo de tareas se deben seguir
- Mientras que las columnas H4 Y H5 se usas para registrar las respuestas

Evaluación de las consecuencias				Consecuencias
H	S	E	O	
N				<b>Falla oculta:</b> Para que valga la pena realizarla, cualquier tarea preventiva debe reducir el riesgo de esta falla a un nivel tolerable.
S	S			<b>Consecuencias para la seguridad:</b> Para que valga la pena realizarla, cualquier tarea preventiva debe reducir por sí sola el riesgo de esta falla a un nivel tolerable.
S	N	S		<b>Consecuencias para el medio ambiente:</b> Para que valga la pena realizarla, cualquier tarea preventiva debe reducir por sí sola el riesgo de esta falla a un nivel tolerable.
S	N	N	S	<b>Consecuencias operacionales:</b> Para que valga la pena realizarla, cualquier tarea preventiva a través del tiempo debe costar menor que el costo total de las consecuencias operacionales más el costo de la reparación de falla que pretende intervenir
S	N	N	N	<b>Consecuencias No Operacionales:</b> Para que valga la pena realizarla, cualquier tarea preventiva a través de un período de tiempo debe costar menos que el costo de la reparación de las fallas que pretende prevenir

*Tabla 1: Consecuencias de falla en hoja de decisión*

Las últimas columnas se usan para apuntar la tarea que se determinó necesaria implementar y en caso de ser necesario su frecuencia. La columna “Tarea propuesta” se utiliza para las situaciones en que se necesite un rediseño, o si se ha decidido que el modo de falla no es motivo de un mantenimiento programado.

A continuación, se presenta un esquema en el que se explican las secciones de la hoja de decisión.

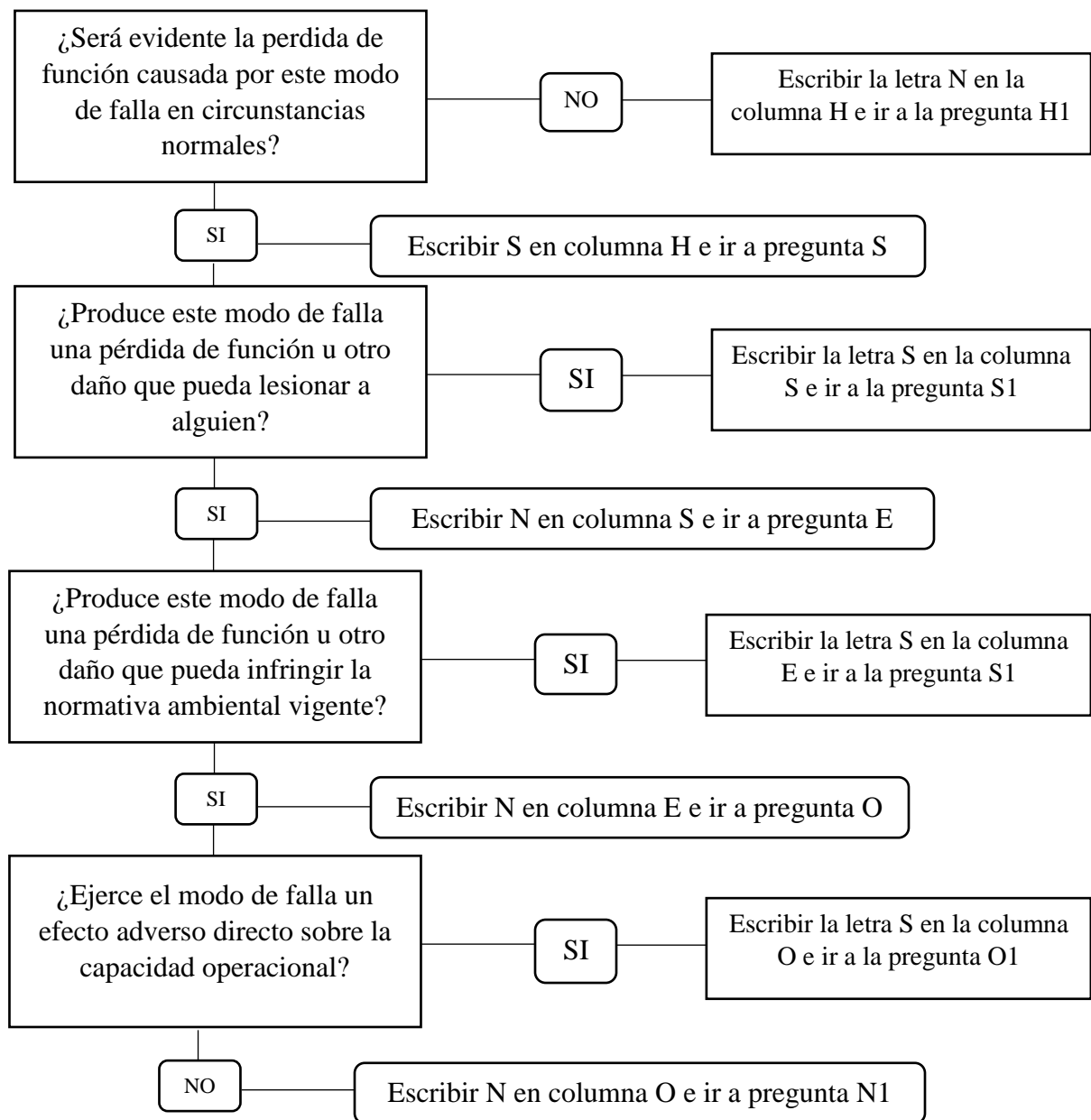


Figura 7: Diagrama explicativo del registro de las consecuencias de falla den la Hoja de Decisión

## Beneficios de RCM

Si bien para cualquier organización es de vital importancia la obtención de los resultados que se han comentado con anterioridad, estos son solo una parte de los beneficios que entrega en mantenimiento basado en confiabilidad, se debe considerar que en la actualidad el mantenimiento no solo se refiera a que los activos cumplan su función, sino que la unidad encargada de mantener tiene expectativas más allá se eso las cuales de detallan a continuación:



- Mayor disponibilidad y confiabilidad de planta
- Mayor seguridad
- Mejor calidad del producto
- No dañar el medioambiente
- Mayor vida de los equipos
- Mayor costo-eficacia

La forma en la que RCM cumple cada una de estas expectativas se detalla a continuación:

### **Mayor seguridad e integridad ambiental**

El mantenimiento centrado en confiabilidad considera en primer lugar las implicancias referentes al medioambiente y a la seguridad por sobre las operacionales. Esto implica que RCM busca ante todo atacar los riesgos que se relacionan con seguridad y medioambiente. El proceso también ayuda a que las personas involucradas en el proceso al regirse por las prioridades de RCM mejoren su postura referente a estos temas.

### **Mejor funcionamiento operacional**

RCM considera que los diversos tipos de mantenimiento aportan valor, por lo mismo entrega reglas y directrices para decidir cuál es el más adecuado para cada situación que se puede llegar a presentar, asegurándose así que a cada activo le sea asignada la tarea que sea más efectiva.

### **Mayor costo-eficacia del mantenimiento**

El mantenimiento basado en confiabilidad se focaliza en las tareas de mantenimiento que pueden llegar a influir mayormente en el desempeño de la planta. En paralelo si el proceso se realiza de manera correcta a los sistemas de mantenimiento ya existentes se reducen los trabajos de rutina entre un 40 y 70%.

### **Mayor vida útil de componentes costosos**

Esto se resguarda debido a la consideración de las técnicas de mantenimiento a condición.

### **Una base de datos global**

El proceso de aplicación de RCM termina con un listado general y completo de todos los requerimientos de mantenimiento de los activos físicos utilizados por la empresa. Esto trae como beneficio la adaptación a las diversas circunstancias sin alterar los planes de mantenimiento que se generan producto del proceso de mantenimiento centrado en confiabilidad. Junto con esto se provee la claridad de las habilidades que se necesitan para poder mantener de manera adecuada de cada activo físico y tener claro cuáles son los repuestos que se deben mantener en stock ahorrando en costo de compra de estos y en costo de bodega.



### **Mayor motivación del personal**

Considerando que para la aplicación de RCM se necesita un constante trabajo en el grupo de revisión y contacto con terceros, el desarrollo del trabajo y sus resultados generan un sentido de pertenencia, por lo tanto, es más probable que las soluciones a las que se llegue perduren en el tiempo y sean respetadas.

### **Mejor trabajo en equipo**

RCM tiene un lenguaje técnico fácil de entender para cualquier persona que trabaje en mantenimiento, dando al personal de mantenimiento y también al personal encargado de operaciones un mejor entendimiento de lo que se puede y no puede llegar a lograr.

## Análisis de Criticidad

En el marco de la elaboración de un plan de mantenimiento de los activos de una organización resulta de vital importancia debido a que el optimizar recursos es una necesidad de cualquier empresa.

Considerando esto es que se realizan los análisis de criticidad cuyo fin es jerarquizar los activos, es decir, ordenar según su impacto en el sistema total que comprende la respectiva organización y así determinar a qué equipos se le debe hacer el estudio que sea necesario para determinar cuáles son las acciones a llevar a cabo en ellos.

Los análisis de criticidad se pueden llevar a cabo de manera tanto cualitativa como cuantitativa, para efectos del presente trabajo se desarrolla el método cualitativo debido a que fue el empleado para su aplicación.

El método cualitativo del análisis de criticidad descansa sobre las opiniones de los especialistas de cada uno de los aspectos que se consideran en el análisis respectivo (Mantenibilidad, impacto en producción, etc.). Su principal característica es la simplicidad que tiene ejecutarlo, pero es usual que se necesiten análisis que posean un mayor nivel de rigurosidad.

Por lo general se trabaja con una mezcla de ambas metodologías, es decir, con un método cualitativo-cuantitativo basado en la filosofía de mantención basada en riesgo, es este se incorporan datos que sean objetivos para en base a esto se pueda elaborar una guía con niveles de criticidad cuantificados, esto para cada uno de los aspectos que sea necesario evaluar. La parte cualitativa de este método está incorporada en la definición del valor que representará los resultados de cada uno de los ítems a medir.

El valor final asignado a cada uno de los equipos se determina sumando los aspectos estudiados (Consecuencia) y multiplicando este resultado por la probabilidad de falla. A dicho valor final se le llama riesgo.

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad} \cdot \text{Consecuencia}$$

Según los rangos establecidos del valor obtenido para riesgo es que se puede clasificar cada uno de los activos en categorías definidas para cada estudio (Criticidad alta, media, baja; Crítico, semi-crítico, no crítico entre otras posibles categorías).

FRECUENCIA	1	SC	SC	C	C	C	C	C
	2	SC	SC	SC	C	C	C	C
	.	NC	SC	SC	SC	C	C	C
	.	NC	NC	SC	SC	SC	C	C
		NC	NC	NC	SC	SC	C	C
	N	NC	NC	NC	NC	SC	SC	C
		1	2	.	.			M
		CONSECUENCIA						

Figura 8: Matriz de criticidad estándar (Pablo Viveros, 2012)

## Contexto

El presente trabajo se realizó en la División Ventanas de Codelco, esta posee la totalidad de sus dependencias tanto administrativas como las referentes a operaciones en la Carretera F30 N°58270 comuna de Puchuncaví.

División Ventanas está compuesta por los procesos de fundición y refinación, en el primero de estos se procesa el concentrado de cobre para producir ánodos de cobre (99.7% de cobre), mientras que en el segundo proceso se obtienen los cátodos de cobre (99.9% de cobre) a partir de los ánodos, ya sean estos provenientes del proceso de fundición o directamente de terceros.

En paralelo a estos procesos la fundición y refinación de ventanas cuenta con una planta de ácido sulfúrico cuyo fin es limpiar los gases provenientes del proceso de fundición.

División Ventanas cuenta con una capacidad anual de:

Proceso	Capacidad [Ton]
Fundición	420.000
Refinería	400.000
Planta de Ácido Sulfúrico	360.000

Tabla 2: Capacidad anual procesos, Codelco División Ventanas

A continuación, se presenta un esquema del funcionamiento de los procesos de la división.

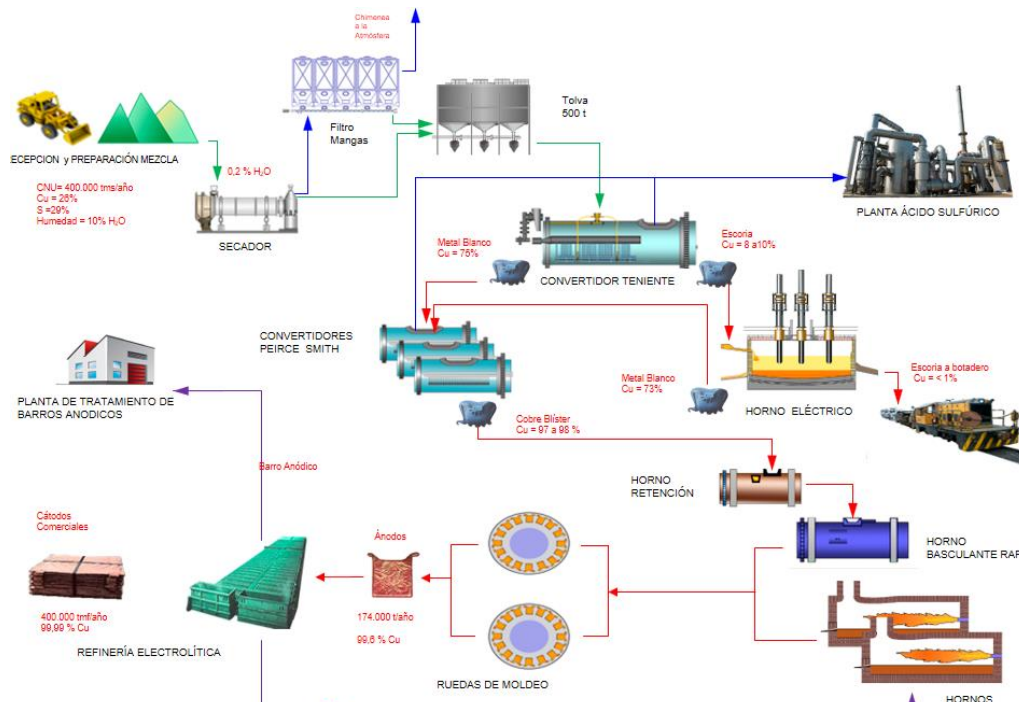


Figura 9: Esquema productivo Codelco División Ventanas

## **Proceso Planta de Ácido**

El presente trabajo se realizó en la planta de ácido de la división, por lo que a continuación se explica más en detalle el funcionamiento de esta.

La Planta de ácido, como se mencionó anteriormente, tiene como función primaria limpiar los gases provenientes del proceso de fundición de manera que los gases emitidos a la atmósfera cumplan con toda la normativa ambiental vigente, la cual indica que:

- a) Las plantas de ácido deben emitir una concentración de  $\text{SO}_2$  inferior o igual a 600 ppm, partes por millón en volumen. El valor límite de emisión de  $\text{SO}_2$  se verificará como concentración promedio horaria, durante cada hora de operación de la planta de ácido.
- b) Las plantas de ácido deben emitir una concentración de As inferior o igual a 1 mg/Nm<sup>3</sup>. El valor límite de emisión de As se verificará una vez al mes.

(Diario Oficial de la República de Chile, 2013)

Para lograr esto la Planta de Ácido divide su proceso en ocho etapas, estos son:

- Captación y Limpieza de Gases
- Lavado de Gases
- Secado de Gases
- Conversión de  $\text{SO}_2$
- Absorción del  $\text{SO}_3$
- Enfriamiento de agua
- Tratamiento de efluentes

### **Captación y Limpieza de Gases**

Es el sistema inicial de la planta de ácido, cuenta con dos líneas de captación de gases una para el Convertidor Teniente (CT) y otra para los Convertidores Pierce Smith (CPS), la función principal de esta etapa es limpiar el particulado presente en los gases, esto se logra a través de los precipitadores electrostáticos, estos a través de campos eléctricos captan el 99% del particulado dejándolo en óptimas condiciones para las etapas posteriores.

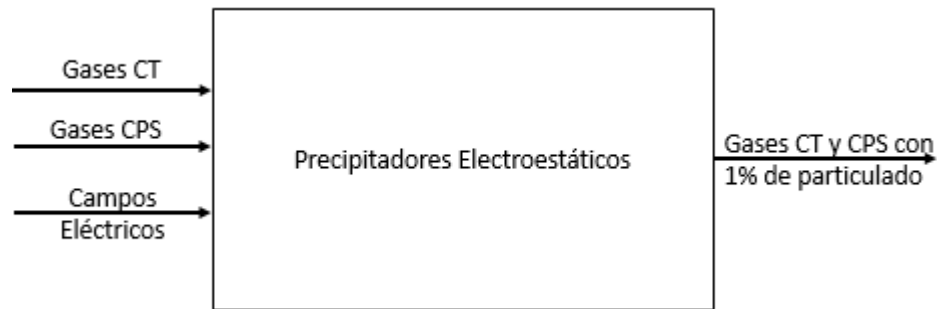


Figura 10: Diagrama EMS, Captación y limpieza de gases

## Lavado de Gases

En esta sección se limpian las impurezas restantes de la etapa anterior, para de esa forma evitar que se generen daños en etapas posteriores del proceso. La tapa de lavado de gases consta de una torre de humidificación que enfría los gases con una solución ácida que a su vez limpia gran parte de los gases, posteriormente estos pasan por un atrapador de neblina y dos torres empacadas, las torres tienen como fin remover agua que haya quedado en los gases. Finalmente, a los gases se les hace pasar por precipitadores electroestáticos húmedos. El gas una vez que ha pasado por esta debe ser ópticamente transparente.

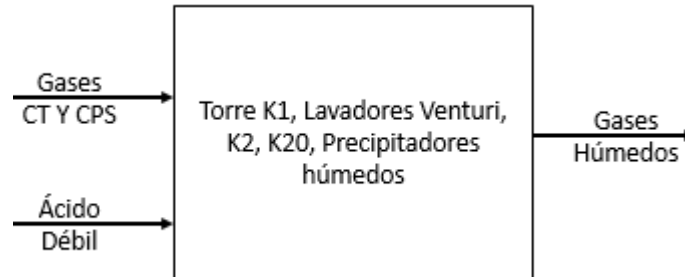


Figura 11: Diagrama EMS, Lavado de Gases

## Secado de Gases

El sistema de secado, como su nombre lo dice, se encarga de quitar la humedad remanente al gas que quedó en este de procesos anteriores.

La etapa consta de 2 torres con un relleno cerámico, en estas se hace entrar en contacto al gas a contra flujo con una solución ácida la cual reacciona con el vapor de agua presente en los gases.

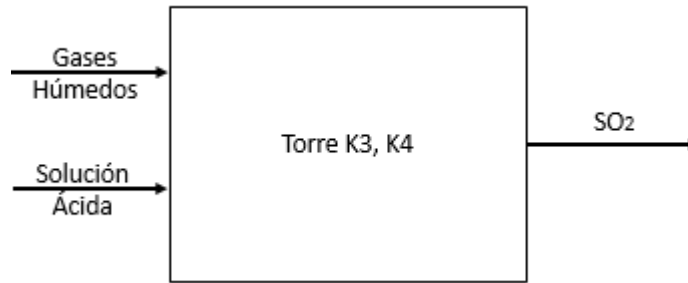


Figura 12: Diagrama EMS, Secado de Gases

## Conversión de SO<sub>2</sub>

La finalidad del proceso de conversión es que el 99,5% del SO<sub>2</sub> sea transformado en SO<sub>3</sub>. Está compuesto por un reactor catalítico que es donde se produce la transformación propiamente tal y por dos intercambiadores de calor, estos se utilizan debido a que la reacción que se presenta en el proceso de transformación es sumamente exotérmica y excede los parámetros de temperatura que se deben presentar para que las etapas posteriores del proceso funcionen con normalidad.

La reacción que determina el paso de SO<sub>2</sub> a SO<sub>3</sub> es la siguiente:

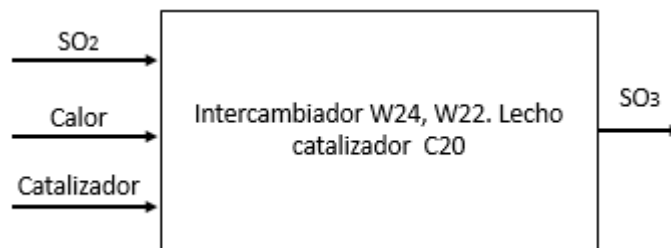
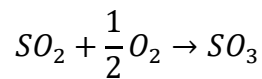


Figura 13: Diagrama EMS, Conversión de SO<sub>2</sub>

## Absorción de SO<sub>3</sub>

El sistema de absorción de SO<sub>3</sub> está hecho para absorber el 99% del SO<sub>3</sub> generado en la etapa anterior. La etapa está compuesta por dos torres de catálisis por las cuales los gases fluyen a contracorriente con una solución de ácido a alta concentración, el SO<sub>3</sub> reacciona con la fracción de agua presente en la solución ácida formando ácido sulfúrico.

A la salida de cada una de las torres se encuentran filtros eliminadores de neblina para remover las gotas de ácido arrastradas por el gas.

La reacción que gobierna el proceso se presenta a continuación:

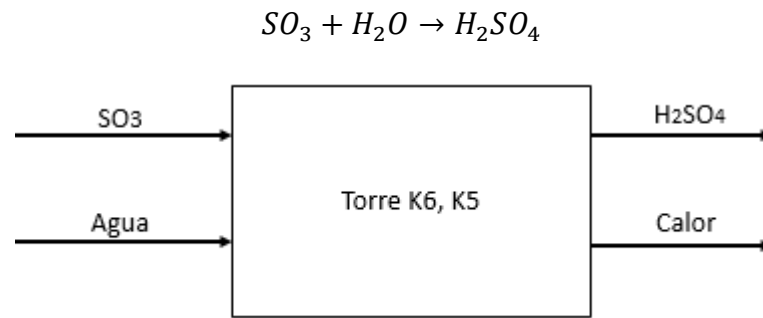


Figura 14: Diagrama EMS, Absorción de  $SO_3$

## Enfriamiento de agua

El sistema de enfriamiento tiene como fin brindar agua para la refrigeración de la Planta de Ácido. Funciona con 2 torres de refrigeración por las cuales el agua se enfría al pasar en contracorriente con un flujo de aire inducido por ventiladores.

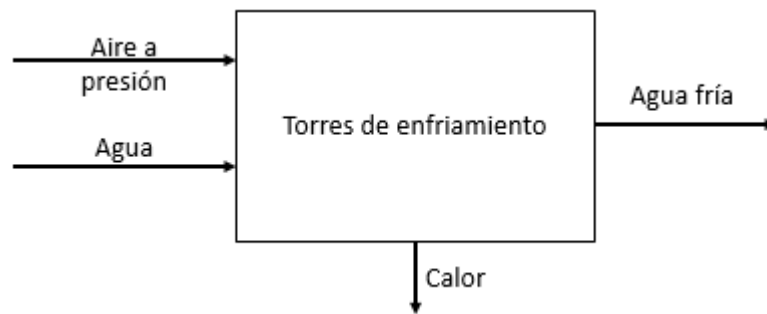
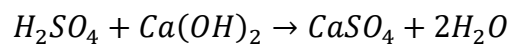


Figura 15: Diagrama EMS, Enfriamiento de agua

## Sistema de tratamiento de Riles

El proceso de la planta de ácido produce residuos líquidos con contenido de ácido sulfúrico, parte de estos se venden a empresas externas mientras que otra parte se trata mediante cal obteniéndose Yeso ( $CaSO_4$ ) y agua la cual se utiliza en la central térmica de la división como agua de refrigeración.

La reacción que gobierna la reacción es la siguiente.



El esquema de la planta de ácido en general de la planta de ácido se presenta a continuación.

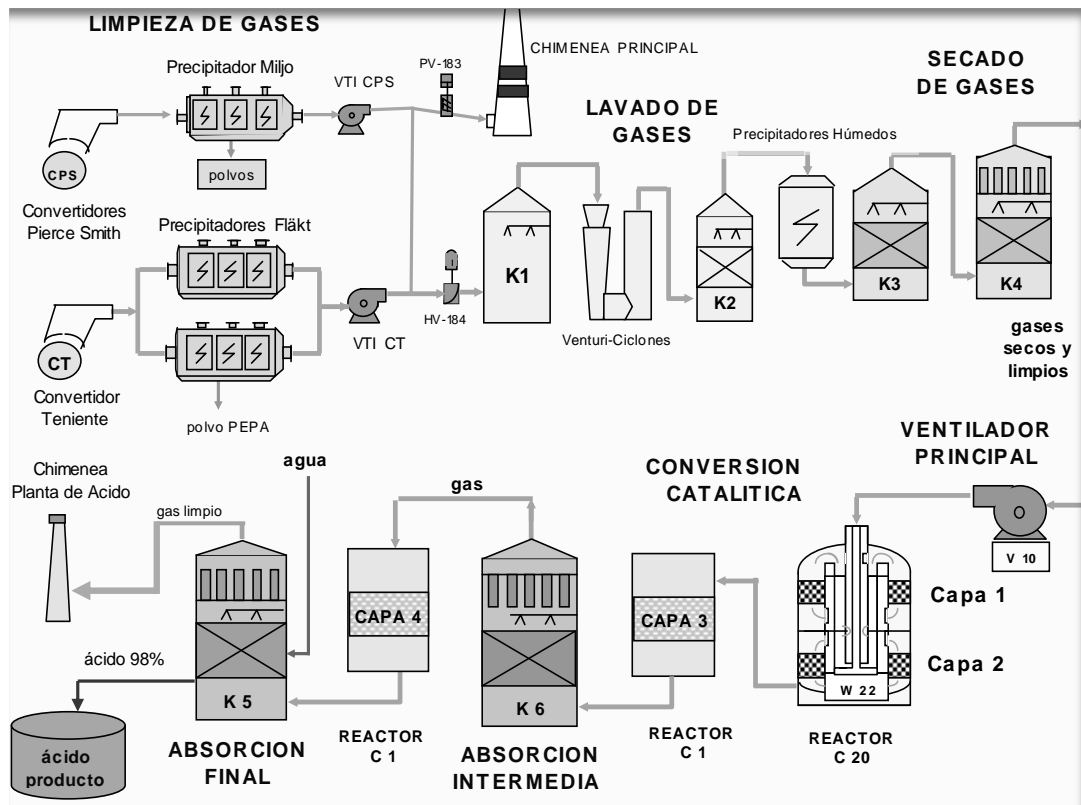


Figura 16: Esquema general de Planta de Ácido

## Gestión del Mantenimiento

Dentro de la gestión de mantenimiento existen divisiones según la especialidad que se requiera, las especialidades que están presentes en esta división de Coldelco son:

- Mecánica
  - Lubricador
  - Predictivo
- Electricista
- Instrumentista
- Plasticista

Cada una de estas especialidades tiene un encargado en diversos niveles variando entre Ingenieros e Ingenieros en Jefe según sea la especialidad y todas están presentes en la

planta de ácido, cada una de las actividades de mantenimiento ejecutadas están asociadas a cada una de estas especialidades.

Toda la información referente al mantenimiento se trabaja mediante el sistema SAP, específicamente el módulo PM, entre otras funciones esta plataforma permite crear ordenes de trabajo en caso de cualquier trabajo que sea necesario realizar y a partir de esto se crea un aviso para que sean ejecutados. Los avisos se clasifican en tipos de avisos y las ordenes se clasifican en clase de orden las cuales se presentan a continuación:

### **Tipos de Avisos**

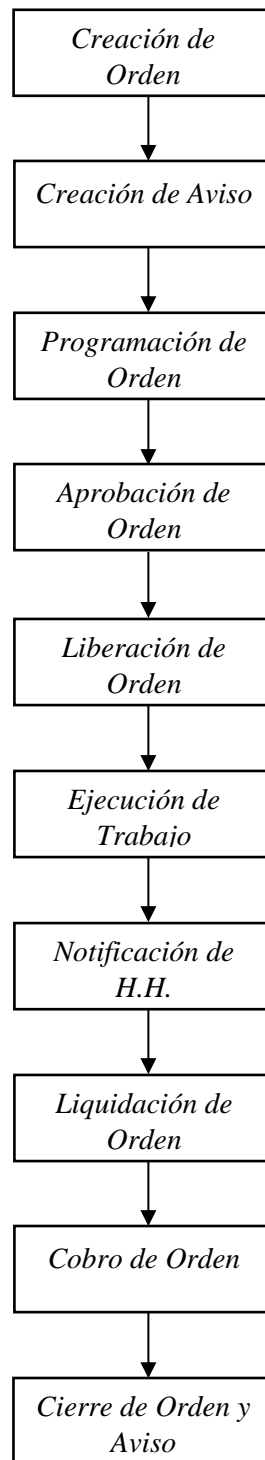
- **M1: Solicitud de Mantención.** Estos avisos se utilizan para registrar actividades como montajes, mantenciones, servicios de ingeniería.
- **M2: Aviso de Avería.** Interrupción imprevista del proceso o en el funcionamiento de un equipo.
- **M3: Aviso de Actividad.** Avisos que documentan mantención preventiva y/o actividades detectadas predictivamente

### **Clase de Ordenes**

- **Mantenimiento no planificado (NP):** Fallas producidas de manera imprevista y que afectan el normal funcionamiento de un equipo. Se subdivide en:
  - *Emergencia:* Fallas en equipos o instalaciones que afectan la producción, seguridad y/o medioambiente. Este tipo de órdenes se deben concretar lo más rápido posible
  - *Correctivo no planificado:* Fallas que sin ser una emergencia propiamente tal, se corrigen sin pasar por un proceso planificado de programación. En esta categoría se incluyen reparaciones producto de algún hallazgo por parte del mantenimiento predictivo
- **Mantenimiento Planificado (PL):** Como su nombre lo indica se refiere a los trabajos que han sido planificados con anterioridad. Se subdivide en:
  - *Preventivo Sistemático:* Se refiere a recursos asociados a acciones de mantenimiento provenientes del plan matriz
  - *Preventivo Predictivo:* Registro de recursos asociados a prevenir detenciones en base a condiciones medibles.
  - *Correctivo Planificado:* Incluye fallas derivadas de inspecciones previas.
- **Modificación (MO):** Ordenes referidas en tareas de modificación, previo estudio y análisis, asegurando su mejor funcionamiento.
- **Servicios de Ingeniería de Mantenimiento (SI):** Trabajo solicitado a ingeniería de mantenimiento, este puede ser en dos modalidades diferentes.



- *Diagnóstico*: Cuando corresponden a acciones cuyo fin es diagnosticar el estado de algún equipo.
- *Estudios*: Estudios o investigaciones para realizar alguna mejora.
- **Servicio de Talleres**: Este divide en cuatro categorías.
  - *Fabricación*: Requerimiento de fabricación de componente.
  - *Reparación*: Requerimiento de reparación de componente.
  - *Modificación*: Requerimiento de modificación de componente.
  - *Montaje*: Requerimiento de montaje de componente o repuesto.
- **Servicio a Terceros**: El requerimiento que es ejecutado por servicio a terceros.



*Figura 17: Diagrama funcionamiento  
Trabajos en plataforma SAP*

## Situación Actual

La División Ventanas se encuentra en la actualidad en un proceso de transición, por un lado, a nivel divisional se encuentran en ejecución nuevos proyectos con el fin de cumplir la nueva norma de fundición la cual a partir de diciembre de 2017 entra en vigencia debiendo cumplirse obligatoriamente, siendo un requisito para la operación de la división.

Independientemente de los proyectos ambientales antes mencionados, a nivel divisional División Ventanas se ve afectada por la brusca caída del cobre de los últimos años que ha mermado profundamente los resultados económicos de las empresas mineral a nivel global.

Año	Precio [c/lb]
2011	399,7
2012	360,6
2013	332,1
2014	311,3
2015	249,2
2016 <sup>1</sup>	210,1

Tabla 3: Precio del Cobre 2011 a 2016

En lo que se refiere a Codelco esto se puede ver graficado en los aportes que ha hecho históricamente al estado de Chile los cuales han disminuido drásticamente en los últimos años como se muestra en la siguiente tabla:

Año	Aportes [Millones de USD]
2011	7033
2012	7518
2013	3889
2014	3033
2015	1075
2016 <sup>2</sup>	223

Tabla 4: Aportes de Codelco al Estado de Chile, 2011-2016

Debido a lo antes mencionado División Ventanas ha hecho grandes esfuerzos para aumentar la productividad y disminuir los tiempos de para, en concordancia con esto Ingeniería de Mantenimiento inició un proceso de revisión de los planes matrices de mantenimiento para todas las áreas del proceso de fundición y refinera, el objetivo de esto es actualizar los ya existente además de realizar un levantamiento de información respecto a equipos presentes, buenas y malas prácticas entre otros.

<sup>1</sup> Precio Cobre 20 de Octubre de 2016, Fuente: [www.portalminero.com](http://www.portalminero.com)

<sup>2</sup> Información referente al primer semestre.



En el levantamiento realizado en el marco del presente trabajo se detectaron diversas falencias a corregir como lo son:

1. Hojas de ruta pocas claras
2. Hojas de Ruta no acorde con la especialidad
3. Mal ingreso de información al sistema SAP
4. Planes de Mantenimiento no ejecutados de manera correcta
5. Listado de equipos desactualizados

Todos estos puntos, entre otros, han hecho que el funcionamiento de la planta de ácido no sea el óptimo presentando fallas evitables si los planes de mantenimiento se realizaran correctamente. Es importante mencionar el tercer punto, el cual dificulta de sobremanera la posibilidad de realizar levantamientos de información de manera cuantitativa, quitando valor a datos de tipos estadísticos y a herramientas gráficas, como el gráfico de Pareto.

Considerando lo expuesto resulta claro que es necesario una revisión tanto de los planes matrices como de las prácticas de mantenimiento.

## Modelo

Para el correcto cumplimiento de los objetivos trazados en el presente trabajo, se presenta el modelo propuesto para la elaboración de la propuesta de los planes de mantenimiento.

Lo primero que se debe hacer es definir en qué equipo planta se aplicará el modelo, es importante que la elección sea concordante con los intereses de la organización por lo que la decisión debe ser avalada por la jefatura directa del personal implicado.

Para la elaboración de las propuestas y por motivos de recursos disponibles se debe definir primeramente los equipos más importantes de la Planta de Ácido, los equipos críticos, es en estos equipos en los que se centra el modelo quedando fuera los que no entren en la clasificación de equipos crítico.

Para la definición de las acciones a aplicar en cada uno de estos equipos se utiliza RCM, esto ya que al ser una herramienta de carácter cualitativo permite evitar errores producto de la mala calidad de información disponible en la división.

- Selección de Equipo y/o Planta
- Análisis de Criticidad y selección de equipos críticos
- Estudio de equipos críticos
- Aplicación de RCM
- Análisis de Resultados
- Validación de Resultados

Es importante mencionar que previo al modelo planteado se trabajó en base a información estadística de las fallas de la planta de ácido en el año 2015, pero luego de realizar variados análisis tanto cuantitativos como cualitativos se determinó que la información no cuenta con la calidad necesaria como para ser considerador válidos los resultados obtenidos en base a su análisis, esta situación provocó que se trabajará con información cualitativa desembocando en el modelo tal y como se presenta.



## **Selección de Equipo y/o Planta**

Primeramente, antes de comenzar a ejecutar cualquier acción se debe definir qué parte de la planta será en la que se aplique el modelo, como se mencionó anteriormente esta decisión debe ser concordante con los intereses de la empresa, debiendo ser validada por la jefatura directa del personal de mantención, pudiendo ser esta una jefatura de departamento, superintendencia o una gerencia.

Para el caso particular que se estudia en el presenta trabajo, se escoge la planta de ácido de la División Ventanas considerando la situación en la se encontraba a enero de 2016, fecha de inicio este trabajo.

En esa fecha, al poco tiempo de haberse realizado la mantención general de la división, se encontraban constantemente hallazgos negativos en la planta de ácido como cañerías con un espesor menor al que debería tener, bombas que al poco tiempo de haber sido instaladas y/o reparadas se encontraban lejos de su punto de máxima eficiencia, todo esto en medio de la ejecución de diversos proyectos medioambientales a nivel divisional que tienen por fin el cumplimiento de la nueva norma ambientas de fundiciones con fecha de aplicación a diciembre de 2016, tema especialmente delicado para la planta de ácido considerando que su función principal es el cumplimiento de la norma ambiental a través de la limpieza de gases producto provenientes de los convertidores.

## Análisis de Criticidad

Es importante mencionar que en la actualidad división Ventanas no cuenta con un sistema formal para terminar la criticidad de los equipos, sin embargo, existe un conocimiento general de los equipos lo que permite considerar de manera cualitativa ciertos equipos principalmente por el impacto que tienen estos o en producción, no obstante esta percepción en la gran mayoría de los casos es personal, lo que tiene por consecuencia que no haya un consenso en la definición de la criticidad de varios de los equipos presentes en la planta trayendo esto como consecuencia la dilatación de las definiciones que conciernen a los equipos cuestionados.

Para la definición de los equipos críticos de la planta se presenta el siguiente esquema con la metodología aplicada considerando cada situación que se presentó en la definición.

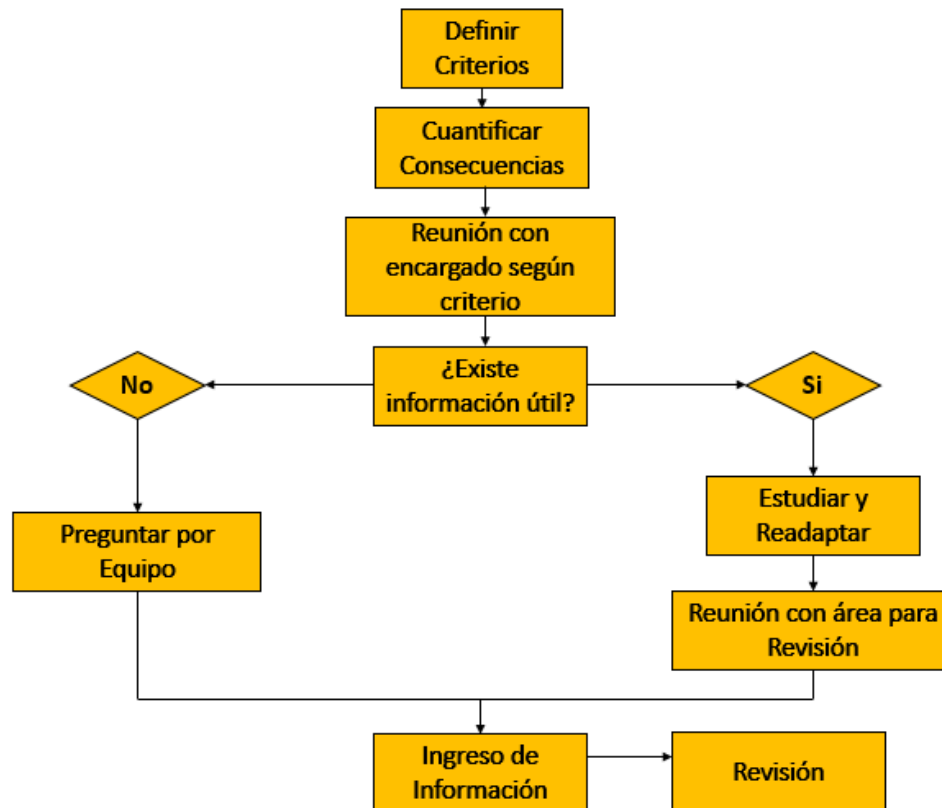


Figura 18: Algoritmo aplicado para la definición de criticidad

El análisis de criticidad realizado se basa en la lista de equipos disponible en la planta a través de la plataforma SAP, considerando que el análisis realizado se basa en la filosofía RBM se definen los siguientes criterios para su evaluación:

- Probabilidad de Falla (PF)
- Mantenibilidad (M)
- Impacto en producción (P)
- Seguridad (S)
- Impacto al Medio Ambiente (MA)

<b>Criterio</b>	<b>Definición</b>	<b>Especialista Consultado</b>
Probabilidad de Falla	Probabilidad de que cualquier componente del sistema a evaluar produzca la pérdida de su función.	Ingeniero Jefe Mantenición Planta de Ácido Ingeniero Jefe Mantenición Mecánica Jefe Mantenición Planta de Ácido
Mantenibilidad	Facilidad para realizar la mantención y reparación a un determinado equipo.	Ingeniero Jefe Mantenición Planta de Ácido Jefe Mantenición Planta de Ácido
Impacto en Producción	Capacidad e impacto que se deja de producir cuando ocurre la falla.	Ingeniero Jefe de Operaciones Planta de Ácido Ingeniero de Procesos
Seguridad	Posibilidad de ocurrencia de eventos no deseados con daños a personas al momento de producirse una falla.	Ingeniero en Prevención de Riesgos
Impacto al Medio Ambiente	Posibilidad de ocurrencia de eventos no deseados con daños al ambiente, al producirse una falla.	Ingeniero Jefe de Operaciones Planta de Ácido

*Tabla 5: Desglose criterios análisis de criticidad*



<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
La máquina es robusta y no se espera que falle.	<b>1</b>
Se encuentra en buenas condiciones (Generalmente estanques o elementos estructurales)	
La máquina es robusta y es poco probable que falle.	<b>2</b>
El ÍTEM ha presentado muy pocas fallas. (Condición Media)	
Presenta fallas perceptibles correspondientes a desgaste o rasgaduras. (Máquina rotatorias generalmente caen dentro de esta categoría).	<b>3</b>
El ÍTEM ha presentado pocas fallas. (Condición Media)	
La máquina ha fallado en forma frecuente.	<b>4</b>
La condición es media. Actualmente se encuentra en condición aceptable.	
La máquina ha fallado en forma frecuente	<b>5</b>
La condición de la máquina es pobre o vieja, pero es de fácil monitoreo	
La máquina ha fallado en forma frecuente y se puede presentar en cualquier momento	<b>6</b>
La condición de la máquina es pobre o vieja y es de monitoreo complejo (Sistemas de varias componentes rotatorios o hidráulicos).	

*Tabla 6: Niveles de probabilidad de falla*



<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
La detención de la máquina no afecta en la generación de ningún tipo de producto. (0% a 5%).	1
La máquina opera producto secundario o terciario y al detenerse impacta en menor medida la producción (5% a 30%).	2
La máquina opera producto secundario o terciario y al detenerse impacta en forma considerable la producción (30% a 60%).	3
La máquina opera producto secundario o terciario y al detenerse impacta mayormente o completamente la línea (60% a 100%).	4
La máquina opera producto primario y al detenerse impacta en menor medida la producción (5% a 30%).	
La máquina opera producto primario y su detención impacta en forma considerable la producción (30% a 70%).	5
La máquina opera producto primario y su detención impacta mayormente o completamente la producción. (70% a 100%).	6

*Tabla 7: Niveles de Impacto en producción*



<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
El tiempo de reparación de la máquina es bajo y los costos asociados son despreciables.	1
El tiempo de reparación de la máquina es de 1 día y los costos asociados son bajos y no afectan mayormente.	2
El tiempo de reparación de la máquina es de 2 días a 3 días y los costos asociados son bajos y no afectan mayormente.	3
El tiempo de reparación de la máquina es de 4 días a 6 días y los costos asociados son considerables.	4
El tiempo de reparación de la máquina es de 4 días a 6 días y los costos asociados son altos y afectan considerablemente.	5
El tiempo de reparación de la máquina es de más de 10 días y los costos asociados son altos y afectan considerablemente.	6

*Tabla 8: Niveles de mantenibilidad*



<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Impacto en las personas es mínimo o ninguno. (Posibles heridas leves, contusiones)	1
Personal en mantención no tiene ningún riesgo (posibles heridas leves o contusiones)	
Impacto en las personas es mínimo o ninguno. Personal en mantención requiere de medidas preventivas adicionales, pero se controlan riesgos.	2
Impacto en las personas es medio (Implica lesiones con pérdida de jornada)	
Personal en mantención debe implementar diversas medidas de seguridad para poder contener el riesgo.	3
Impacto en las personas es medio-Alto (implica lesiones mayores)	
Personal en mantención debe implementar medidas de apoyo especiales (Debe realizar PST en rigor con apoyo, arnés o trabajo en caliente)	4
Impacto en las personas grave. (amputaciones, incapacidad permanente, etc)	
Personal en mantención debe utilizar medidas previas y durante de alta preocupación (Espacios Confinados, etc)	5
Impacto en las personas extremadamente grave. Muerte o varias muertes en el entorno, daño catastrófico.	
Personal en mantención debe asegurar la zona ya que existe un riesgo latente en las personas que circulan cerca del área. (gases o líquidos inflamables, corrosivos o reactivos)	6

*Tabla 9: Niveles de Seguridad*

Descripción	Valor
Impacto en el ambiente es mínimo o ninguno (la recuperación es inmediata y fácil)	1
No se requiere un despliegue que permita asegurar el área.	
Impacto en el ambiente es mínimo, pero se deben implementar diversas medidas para poder contener el riesgo ambiental.	2
Impacto en el ambiente asociado es relevante, pero al implementar diversas medidas para poder contener se tiene una recuperación sin relevancia en el medio externo.	3
El impacto asociado requiere de un plan de restauración del recurso, es visible tanto internamente como la comunidad se deben solicitar recursos a para poder contener	4
El impacto ambiental es significativo internamente y la comunidad y se requiere de la presencia de especialistas que indiquen los pasos a seguir bajo programas de descontaminación y recuperación.	5
El impacto ambiental daña tanto a recursos naturales como a la imagen de la empresa. Acarrea problemas legales de consideración.	6
Se da aviso a la comunidad y a entidades públicas con el fin de no desencadenar una catástrofe peor, etc.	

Tabla 10: Niveles impacto al medio ambiente

Estos criterios se evalúan con una escala de 1 a 6, siendo 1 el mínimo y 6 el máximo, siendo el valor de criticidad o riesgo calculado mediante la siguiente fórmula.

$$\text{Criticidad} = PF(M \cdot P \cdot S \cdot MA)$$

La definición de que equipo se considera con criticidad alta media o baja, se determina considerando la escala de 1 a 6 que se mencionó anteriormente, categorizando los valores de la siguiente manera:

- Bajo: 1 y 2
- Medio: 3 y 4
- Alto: 5 y 6

Una vez categorizados los valores, se ingresan a la fórmula el máximo de cada categoría en cada uno de los criterios, para definir el intervalo máximo de cada nivel de criticidad, este proceso se presenta a continuación.

Nivel de Criticidad	Valor máximo por criterio	Calculo de Criticidad (C)	Valor máximo calculado (C)
Bajo	2	$C = 2 \cdot (2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2)$	16
Medio	4	$C = 4 \cdot (4 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 4)$	64
Alto	6	$C = 6 \cdot (6 \cdot 6 \cdot 6 \cdot 6)$	7776

Tabla 11: Calculo para definir límites de criticidad

Durante la aplicación del análisis siguiendo los parámetros de la tabla 5 se obtuvieron en su mayoría resultados satisfactorios siendo estos validados por el personal de la planta, no obstante en determinados equipos cuya detención implica una detención inmediata de la planta no quedaron dentro de la categoría de alto nivel de criticidad, por lo que a los criterios presentados se le agregó uno adicional, este es que si un equipo obtiene un valor 6 en el impacto a la producción este queda inmediatamente en la categoría de nivel de criticidad alto.

Se considera que un equipo tiene criticidad alta, media o baja según la siguiente tabla.

Nivel de Criticidad	Condición
Alto	$\text{Criticidad} \geq 65, P=6$
Medio	$17 \leq \text{Criticidad} \leq 64$
Bajo	$\text{Criticidad} \leq 16$

Tabla 12, Niveles de Criticidad

Los requisitos para la aplicación de la metodología aquí presentada son:

- Lugar físico
- Especialista en el criterio
- Especialista en el proceso
- Computador

A continuación, se presenta un análisis FODA de la metodología empleada.

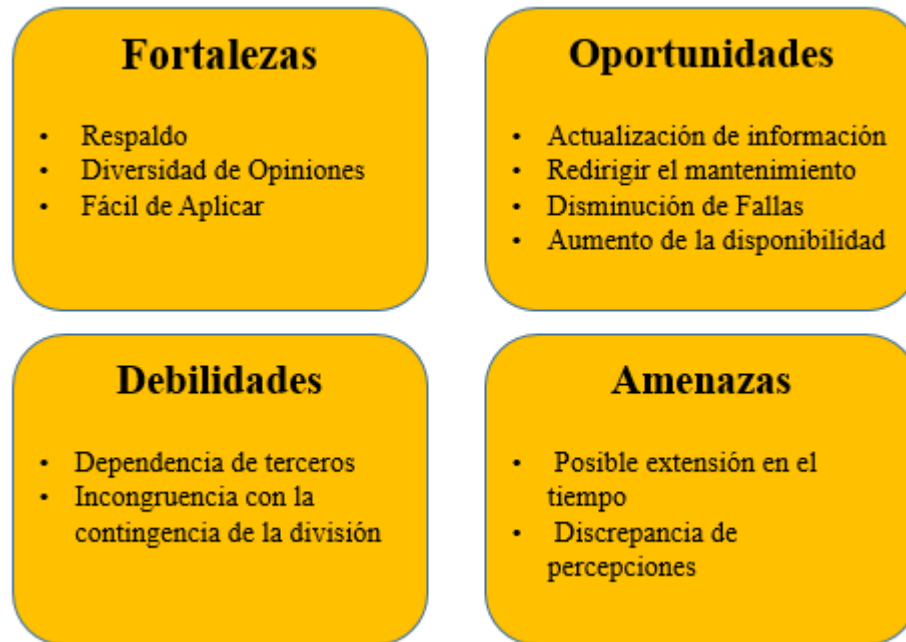


Figura 19: Análisis FODA de metodología para definir criticidad

## Resultados definición de Criticidad

Este método para la definición de la criticidad se aplica a los 292 equipos de la planta de ácido obteniéndose los siguientes resultados:

Criticidad	Equipos	
Alta	57	19,52%
Media	154	52,74%
Baja	81	27,74%
<b>Total</b>	<b>292</b>	<b>100%</b>

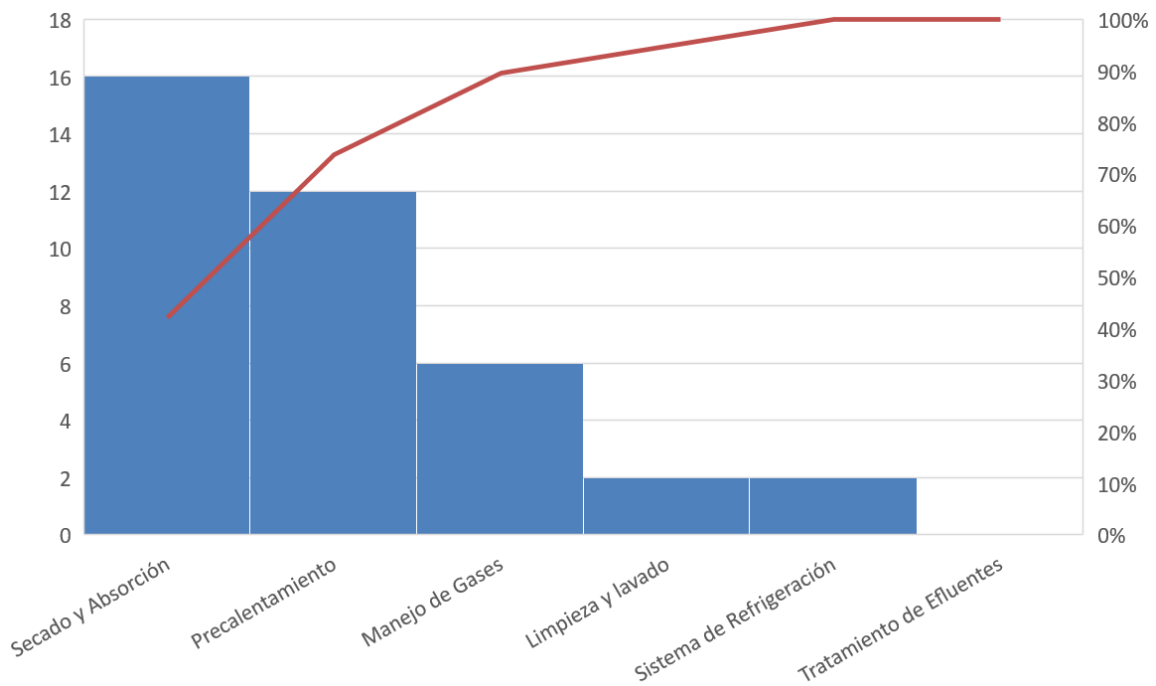
Tabla 13: Resultados Análisis de Criticidad

Sección Planta	Alta	Media	Baja
Manejo de Gases	6	28	4
Limpieza y lavado de gases	2	34	8
Secado y Absorción de Gases	16	33	3
Pre calentamiento	12	15	17
Sistema de Refrigeración	2	18	6
Tratamiento de Efluentes	0	24	40
Sistema Genérico	19	2	3
<b>Total</b>	<b>57</b>	<b>154</b>	<b>81</b>

Tabla 14: Desglose Análisis de Criticidad

Es importante mencionar lo que se presenta como sistema genérico, se le llama sistema genérico a equipos que tienen influencia sobre toda la planta, en esta categoría están considerados principalmente los equipos eléctricos que permiten que la planta de ácido se alimente de energía eléctrica, como son los transformadores, debido a esto los equipos dentro de esta categoría no son considerados en el desarrollo de este trabajo. También se debe considerar que la cantidad de equipos críticos presentados se deben en parte al nivel de detalle presente en el sistema SAP, sistema a equipos en stand-by como equipos diferentes.

En lo que se refiere a los resultados propiamente tal se puede apreciar fácilmente que la mayor cantidad de equipos críticos se encuentran en las etapas de “Secado y Absorción” y “Precalentamiento”, esto se ve graficado en el siguiente gráfico de Pareto, el cual debido a lo explicado anteriormente no considera a los equipos genéricos.



*Gráfico 1: Diagrama de Pareto de Equipos Críticos*

La distribución que se muestra en el gráfico de Pareto se explica debido a que en las áreas de “Secado y Absorción” y “Precalentamiento” se produce la conversión a  $\text{SO}_3$  y de este a ácido sulfúrico, procesos que se basan en reacciones sumamente exotérmicas lo cual implica que los equipos estén sometidos constantemente a grandes esfuerzos, junto con esto tanto en  $\text{SO}_3$  y el ácido sulfúrico son sustancias sumamente peligrosas tanto para el personal como para el entorno si su tratamiento no es el adecuado o si se llegara a producir una falla, esto puede derivar en intoxicaciones o accidentes con consecuencias fatales.

Dentro de los equipos considerados como críticos y para efectos del presente trabajo se realizarán los estudios y análisis a los equipos considerados como equipos mecánicos, esto debido a que gran parte de los equipos seleccionados como críticos están fuera de la especialidad mecánica quedando fuera del alcance del presente trabajo. Los equipos que han sido seleccionados como críticos luego de realizar el análisis de criticidad se presentan en la siguiente tabla:

Sistemas	Nivel de criticidad		PF	P	M	S	MA	Especialidad
Damper mariposa hv-466	16	Alta	1	6	5	3	2	Instrumentista
Instr.y ctrol de llama quem. Gnc	44	Alta	3	6	2	2	5	Instrumentista
Quemador piloto encendido	44	Alta	3	6	2	2	5	Instrumentista
Instr. Local aire combust.gnc	38	Alta	3	6	2	2	3	Instrumentista
Bomba de ácido p70/1	63	Alta	3	6	5	6	4	Mecánica
Bomba centrifuga p70/1	63	Alta	3	6	5	6	4	Mecánica
Bomba de ácido p70/3	63	Alta	3	6	5	6	4	Mecánica
Válvulas agua sist. Abs.	80	Alta	4	5	5	6	4	Instrumentista
Válvulas ácido sist. Abs.	100	Alta	5	5	5	6	4	Instrumentista
Estanque acido producto b-6	72	Alta	4	5	3	6	4	Plasticista
Cañerías ácido.	100	Alta	5	5	5	6	4	Plasticista
Bomba acido producto p5/1	80	Alta	4	5	5	6	4	Mecánica
Bomba acido producto p5/2	80	Alta	4	5	5	6	4	Mecánica
Cañerías ácido bba. P6	80	Alta	4	5	5	6	4	Plasticista
Bomba de ácido p6/1	80	Alta	4	5	5	6	4	Mecánica
Bomba de ácido p6/2	80	Alta	4	5	5	6	4	Mecánica
Bomba de ácido p4/1	80	Alta	4	5	5	6	4	Mecánica
Bomba de ácido p4/2	80	Alta	4	5	5	6	4	Mecánica
Bomba de ácido p4/3	80	Alta	4	5	5	6	4	Mecánica
Analizador Concentración acido	42	Alta	2	6	3	6	6	Plasticista
Sistema ventilador principal	34	Alta	2	6	3	3	5	Instrumentista
SIA ventilador v-10	34	Alta	1	6	3	3	5	Mecánica

*Tabla 15: Equipos críticos análisis de criticidad*

En base a la tabla presentada, los equipos que se estudiarán desde este punto en adelante son los siguientes:

- Sistema Bombas P1
- Sistema Bombas P6
- Sistema Bombas P70
- Sistema Bombas P5
- Sistema Bombas P4
- Bomba P58
- Bomba P5N
- Intercambiador de Calor W24

Es importante mencionar que se deja fuera de este estudio al ventilador principal de la planta ya que este cuenta con un plan de mantenimiento especial en relación al resto de la planta, compuesto por actividades del tipo predictivo y preventivo que ha dado buenos resultados graficados en que desde que este equipo se instaló en la planta no ha presentado fallas.

## **Descripción Equipos Críticos**

### **Sistema Bombas P1**

Este sistema se sitúa al inicio del sistema de lavado de gases, su función es hacer circular solución de ácido débil para que esta limpie de arsénico y otras impurezas el gas proveniente de la etapa de captación de gases. Junto con la limpieza de los gases también se cumple la función de regular la temperatura de los gases para las fases posteriores.

El sistema está compuesto por una bomba en funcionamiento y otra en stand-by

### **Sistema de Bombas P4**

El sistema de bombas P4 bombea la solución de ácido desde el fondo de la torre K3 hacia su parte superior, con el fin de entrar en contacto con los gases húmedos y así eliminar el agua presente en estos, producto del proceso de lavado

### **Sistema Bombas P6**

Su función es bombear solución de ácido a 94-97% de concentración, con el fin de poder remover completamente los últimos vestigios de agua que se encuentran en el gas.

El sistema de bombas P6 está compuesto por dos bombas, una en stand-by y la otra en operación

### **Sistema Bomba P70**

La función del sistema de bombas P70 consiste en bombear el ácido desde el fondo de la torre K6 hacia los intercambiadores de placa, desde donde vuelen a ser ingresados a la torre K6 por la parte superior para que reaccione con el  $\text{SO}_3$  presente en el gas formando ácido sulfúrico.



### **Sistema Bomba P5**

Bomba cuya función es despachar hacia estanque el ácido producto, este ácido se utiliza para venta y para el mismo funcionamiento de la planta.

### **Bomba P58**

Bomba encargada de entregar en agua potable para dilución, duchas de emergencia y enfriamiento de ventilador principal de la planta.

### **Bomba P5N**

La función la bomba P5N consiste en bombear el ácido desde la parte inferior de la torre K5 hacia los intercambiadores de placa, desde donde vuelen a ser ingresados a la torre K5 por la parte superior para que reaccione con los últimos vestigios de  $\text{SO}_3$  presente en el gas formando ácido sulfúrico.

### **Intercambiador de Calor W24**

Intercambiador de calor de tubos gas-gas cuya función es regular el gas de entrada al lecho catalizador C20 y a la torre de catálisis K5.

## **Aplicación de RCM**

A los equipos que se han seleccionados como críticos se les aplica un análisis RCM para determinar cuáles son las acciones necesarias para un correcto funcionamiento de los equipos, una vez hecho esto se contrastarán estas acciones con las existentes para determinar cuales hay que agregar al plan matriz de mantenimiento. La secuencia de pasos a seguir para la realización del presente análisis es:

- Recopilación de información
- Análisis de Información
- Definición de Acciones
- Comparación con acciones existentes
- Sugerencia de resultados

Para la correcta aplicación del mantenimiento una vez que se determinaron los equipos críticos a estudiar, se procede a realizar una serie de entrevistas con el personal de la planta con el fin de obtener respuestas a las siete preguntas básicas de la confiabilidad. La información obtenida de las entrevistas es analizada con las herramientas antes mencionadas para así llegar a las acciones requeridas a través del árbol de decisiones una vez hecho esto para cada uno de los equipos, estas acciones una vez determinadas son contrastadas con los planes matrices existentes, llegando así a las acciones faltantes.

## **Recopilación de Información**

Como se mencionó anteriormente una vez definido los equipos críticos se realizó una serie de entrevistas para determinar las acciones faltantes, las personas que facilitaron la información son:

- Ingeniero Jefe de Mantenimiento Mecánica
- Ingeniero Jefe Mantenimiento Predictivo
- Ingeniero de Procesos

Es importante mencionar que no se conformó un equipo RCM propiamente tal, sino que una vez que se realizaba la entrevista con el profesional respectivo se completaba parcialmente la hoja de información y luego se realizaba otra entrevista hasta completar la hoja de cada uno de los equipos. También se debe mencionar que el personal consultado no ha sido capacitado por profesionales en RCM, pero si contaban con conocimientos generales sobre el tema y previamente a la entrevista se realiza una breve descripción del procedimiento.

## Costo de Ineficiencia

El costo de ineficiencia representa el monto que se deja de percibir producto de una detención.

En el caso particular del la planta de ácido el costo de ineficiencia considera también el proceso de fundición, debido a la imposibilidad de operar esta sin el debido tratamiento de los gases producto.

El costo de ineficiencia se utiliza como referencia para la decisión referente a las tareas de mantenimiento.

Para el cálculo de hacen las siguientes consideraciones basadas en el información propia de la división, las cuales se detallan a continuación:

- Se consideta que el 30% del concentrado de cobre llega a ser cobre fino que es el que finalmte de vende.
- Parte de los ánodos de cobre no se transforman directamente en cobre fino debido a que no es cubierto por el electrolito líquido con el que se trata, sin embargo, se vuelve a tratar como cobre anódico por lo que es incorporado a los cátodos que se venden posteriormente, esta parte de los ánodos llamado scapt corresponde a 63.000 toneladas al año

Cabe destacar que la información utilizada es puramente referencial

Para el cálculo de costo de ineficiencia se consideran los siguientes datos:

<b>Horas año</b>	8000
<b>Toneladas Concentrado de Cobre al año</b>	400000
<b>Scapt</b>	63000
<b>Ton. Cobre Fino de Fundición</b>	120000
<b>Precio cobre [USD/lbcu]</b>	2,25
<b>Precio [USD/tonCu]</b>	4.961
<b>Toneladas Ácido</b>	337000
<b>Precio Ácido[USD/Ton]</b>	55

Tabla 16: Datos costo de ineficiencia

El cálculo realizado se presenta a continuación:

$$CI(USD/h) = \frac{(Toneladas Concentrado Cu + Scapt) \cdot Precio_{Cu}}{Horas} = 76.737 (USD/h)$$

## Análisis de Información

Para un correcto análisis de información se utiliza AMFE en las hojas de información con el fin de aprovechar completamente el potencial de RCM.

Para en análisis de la información recopilada se utiliza la hoja de información, en esta se incluye la información de función, falla funcional, modo de falla y la consecuencia de falla para cada uno de los equipos estudiados, adicionalmente se complementa esta información con factores referidos a:

- Detección de la falla, (D)
- Frecuencia de la falla (F)
- Severidad de la falla (S)

El detalle de los factores se presenta en las siguientes tablas:

<b>Criterio</b>	<b>Valor</b>
Ínfima. El defecto sería imperceptible por el usuario	1
Escasa. El cliente puede notar una falla menor, pero sólo provoca una ligera molestia	2-3
Baja. El cliente nota la falla y le produce cierto enojo	4-5
Moderada. La falla produce disgusto e insatisfacción el cliente	6-7
Elevada. La falla es crítico, originando un alto grado de insatisfacción en el cliente	8-9
Muy elevada. La falla implica problemas de seguridad o de no conformidad con los reglamentos en vigor	10

Tabla 17: Factores de severidad (Diputación Foral de Bizcaia)

<b>Criterio</b>	<b>Valor</b>
Muy escasa probabilidad de ocurrencia. Defecto inexistente en el pasado	1
Escasa probabilidad de ocurrencia. Muy pocos fallas en circunstancias pasadas similares	2-3
Moderada probabilidad de ocurrencia. Defecto aparecido ocasionalmente	4-5
Frecuente probabilidad de ocurrencia. En circunstancias similares anteriores la falla se ha presentado con cierta frecuencia	6-7
Elevada probabilidad de ocurrencia. La falla se ha presentado frecuentemente en el pasado	8-9
Muy elevada probabilidad de falla. Es seguro que el falla se producirá frecuentemente	10

Tabla 18: Factores de Probabilidad de Falla (Diputación Foral de Bizcaia)

<b>Criterio</b>	<b>Valor</b>
Muy escasa. El defecto es obvio. Resulta muy improbable que no sea detectado por los controles existentes.	1
Escasa. El defecto, aunque es obvio y fácilmente detectable, podría raramente escapar a algún control primario, pero sería posteriormente detectado	2-3
Moderada. El defecto es una característica de bastante fácil detección	4-5
Frecuente. Defectos de difícil detección que con relativa frecuencia llega al cliente	6-7
Elevada. El defecto es de naturaleza tal, que su detección es relativamente improbable mediante los procedimientos convencionales de control y ensayo	8-9
Muy elevada. El defecto con mucha probabilidad llegará al cliente, por ser muy difícil de detectar.	10

*Tabla 19: Factores de Detección (Diputación Foral de Bizcaia)*

A continuación, se presentan las hojas tanto de información como de decisión de los equipos seleccionados como críticos. Es importante mencionar que por el carácter académico del presente trabajo no se incluye la columna referente al responsable de la acción sugerida.

## Sistema Bomba P1

Función o Componente del Servicio	Falla Funcional	Modo de Falla	F	Efectos de las fallas	S	D	Consecuencia de las fallas	NPR	
1 Bombear la solución ácida con la que se limpian los gases en la torre K1 y se eliminan los restos de arsénico presentes en estos, junto con esto regulan la temperatura de los gases.	1 Pérdida de Función	A Desalineamiento	4	1	Daño de acoplamiento con motor	6	5	<b>Operacional:</b> Detención de planta en caso de sobrepasar límites permitidos de vibración y/o temperatura.	120
		B Rotura de Rodete	2	2	Imposibilidad de continuar con operación normal de la bomba	7	7	<b>Operacional:</b> Detención de planta en caso de sobrepasar límites permitidos de vibración y/o temperatura. Se produce progresivamente la disminución de la eficiencia de la bomba	98
		C Rotura Sello Mecánico	4	3	Fugas de ácido	5	5	<b>Seguridad:</b> Implica detención debido al riesgo propio del ácido fuera de control <b>Operacional:</b> Implica detención de equipo	100
	2 Caudal Insuficiente	A Soltura	3	1	Desgaste excesivo de cojinetes, exceso de vibración	8	4	<b>Operacional:</b> Detención de planta en caso de sobrepasar límites permitidos de vibración y/o temperatura	96
		B Abrasión	2	2	Desgaste progresivo en impulsor	4	3	<b>Consecuencia no evidente:</b> deriva en posibles fallas futuros por otras causas	24
		C Desgaste	3	4	Deterioro progresivo de componentes de la bomba	5	4	<b>Consecuencia no evidente:</b> deriva en posibles fallas futuros por otras causas	60

Tabla 20: Hoja de información sistema bomba P1



Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias				H1	H2	H3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Estado	Intervalo Inicial
							S1	S2	S3	H4	H5	S4			
F	FF	MF	H	S	E	O	O1	O2	O3						
							N1	N2	N3						
1	1	A	S	N	S		S						Tarea programada con sistema en condición	Existente	
1	1	B	S	N	S		N	S					Tarea de búsqueda de fallas programada: Considerando que la rotura de rodete no se presenta de forma uniforme en el tiempo se recomienda una inspección trimestral para detectar indicios de la deformación que provoca la rotura.	Faltante	Trimestral
1	1	C	S	S			N	S					Tarea de Restauración programada	Existente	
1	2	A	S	N	S		S						Tarea programada con sistema en condición	Existente	
1	2	B	S	N	N	S	N	N	N	S			Se recomienda área programada de búsqueda de fallas en lugar de restauración programada considerando la etapa de la bomba del proceso.	Faltante	Trimestral
1	2	C	N				N	S					Tarea de Inspección programada	Faltante	Trimestral

Tabla 21: Hoja de decisión Bomba P1

## Sistema Bomba P4

Función o Componente del Servicio	Falla Funcional	Modo de Falla	F	Efectos de las fallas	S	D	Consecuencia de las fallas	NPR	
1 Función se encargan de bombear la solución de ácido a la torre de catálisis K3	1 Pérdida de Función	A Desalineamiento	5	1	Daño de acoplamiento con motor	6	6	<b>Operacional:</b> Detiene el proceso en caso de presentar vibraciones sobre los límites permitidos, afectando la operación.	180
		B Rotura de Rodete	1	2	Imposibilidad de continuar con operación normal de la bomba	9	10	<b>Operacional:</b> Detención inmediata del equipo en caso de que la bomba de respaldo no esté en condiciones óptimas.	90
		C Rotura Sello Mecánico	3	3	Fugas de ácido	10	7	<b>Seguridad:</b> Posibles daños a personas por la posibilidad de entrar en contacto con ácido, también implica detención de la planta	210
	2 Caudal Insuficiente	A Soltura	3	1	Desgaste excesivo de cojinetes, exceso de vibración	6	6	<b>Operacional:</b> Permite el paso de humedad excesiva al proceso afectando los filtros vela y por lo tanto aumentando la presión del circuito, esto implica que deja de operar el ventilados V10 lo que implica una detención inmediata de la planta de ácido y por lo tanto también de la fundición	108
		B Abrasión	2	2	Desgaste progresivo en impulsor	3	2	<b>Operacional:</b> Disminución de caudal, baja eficiencia	12
		C Desgaste	3	4	Deterioro progresivo de componentes de la bomba	5	3	<b>Consecuencia no evidente:</b> deriva en posibles fallas futuros por otras causas.	45

Tabla 22: Hoja de Información Bomba P4



Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias				H1	H2	H3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Estado	Intervalo Inicial
							S1	S2	S3	O1	O2	O3			
F	FF	MF	H	S	E	O	N1	N2	N3						
1	1	A	S	N	N	S	S						Tarea programada con sistema en condición	Existente	
1	1	B	S	N	N	S	N	N	S				Tarea de inspección programada: Se recomienda inspección del rodete de la bomba, en búsqueda de algún indicio de deformación	Faltante	Semestral
1	1	C	S	S			N	S					Tarea de Inspección Programada: Hoja de ruta del plan no especifica en particular el sello mecánico por lo que se recomienda especificar este punto y determinar la frecuencia de cambio utilizando como referencia la entregada por el fabricante.	Existente	
1	2	A	S	N	S		S						Tarea programada con sistema en condición	Existente	
1	2	B	S	N	N	S	N	N	S				Tarea de revisión programada: Se recomienda una inspección esto considerando que la abrasión además de ser un modo de falla es una condición intrínseca de una bomba	Faltante	Anual
1	2	C	N				N	S					Tarea de restauración programada	Existente	

*Tabla 23: Hoja de Información Sistema Bomba P4*

## Sistema Bomba P6

Función	Falla Funcional	Modo de Falla	F	Efectos de las fallas	S	D	Consecuencia de las fallas	NPR
1 Función se encargan de bombear la solución de ácido a la torre de catálisis K4	1 Pérdida de Función	A Desalineamiento	5	1 Daño de acoplamiento con motor	6	6	<b>Operacional:</b> Detiene el proceso en caso de presentar vibraciones sobre los límites permitidos, afectando la operación.	180
		B Rotura Sello Mecánico	3	3 Fugas de ácido	10	7	<b>Seguridad:</b> Posibles daños a personas por la posibilidad de entrar en contacto con ácido, también implica detención de la planta	210
	2 Caudal Insuficiente	A Soltura	3	1 Desgaste excesivo de cojinetes, exceso de vibración	6	6	Permite el paso de humedad excesiva al proceso afectando los filtros vela y por lo tanto aumentando la presión del circuito, esto implica que deja de operar el ventilados V10 lo que implica una detención inmediata de la planta de ácido y por lo tanto también de la fundición	108
		B Abrasión	2	2 Desgaste progresivo en impulsor	3	2	Consecuencia no evidente: deriva en posibles fallas futuros por otras causas	12
		C Desgaste	3	4 Deterioro progresivo de componentes de la bomba	5	3	Consecuencia no evidente: deriva en posibles fallas futuros por otras causas	45

Tabla 24: Hoja de Información Sistema Bomba P6



Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias				H1	H2	H3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Estado	Intervalo Inicial
							S1	S2	S3	H4	H5	S4			
F	FF	MF	H	S	E	O	O1	O2	O3						
							N1	N2	N3						
1	1	A	S	N	N	S	S						Tarea programada con sistema en condición	Existente	
1	1	C	S	S			N	S					Tarea de Inspección programada: Hoja de ruta del plan no especifica en particular el sello mecánico por lo que se recomienda especificar este punto.	Existente	
1	2	A	S	N	S		S						Tarea programada con sistema en condición	Existente	
1	2	B	S	N	N	S	N	N	S				Tarea de sustitución programada: Se recomienda complementar la tarea de sustitución programada con una inspección al momento del desarme de la bomba para su respectiva mantención, esto considerando que la abrasión además de ser un modo de falla es una condición intrínseca de una bomba	Faltante	Anual
1	2	D	N				N	S					Tarea de restauración programada	Existente	

*Tabla 25: Hoja de Decisión Sistema Bomba P6*

## Sistema Bomba P70

Función	Falla Funcional	Modo de Falla	F	Efectos de las fallas	S	D	Consecuencia de las fallas	NPR	
1 Función se encargan de bombear la solución de ácido a la torre de catálisis K6	1 Pérdida de Función	A Desalineamiento	4	1	Daño de acoplamiento con motor	5	4	<b>Operacional:</b> Detección de planta en caso de sobrepasar límites permitidos de vibración y/o corte de transmisión motor-bomba	80
		B Rotura Sello Mecánico	4	3	Fugas de ácido	9	2	<b>Seguridad:</b> Derrame de ácido en alta concentración, implicando un riesgo para la seguridad de las personas <b>Operacional:</b> implica una detención de planta	72
	2 Caudal Insuficiente	A Soltura	3	1	Desgaste excesivo de cojinetes, exceso de vibración	8	4	<b>Medioambiental:</b> Caudal insuficiente implica que no hay suficiente flujo para absorber el SO <sub>3</sub> enviándolo a la chimenea generando neblina ácida (Generando daño al medio ambiente y un posible daño a las personas), <b>Consecuencia no Evidente:</b> La existencia de SO <sub>3</sub> en la PTGC implica una reacción exotérmica que daña progresivamente la instalación	96
		B Abrasión	2	2	Desgaste progresivo en impulsor	5	6	<b>Operacional:</b> Desgaste progresivo del rodete, implica que progresivamente la bomba se hace menos eficiente y/o disminuya el caudal que se despacha a la torre de catálisis	60
		D Desgaste	3	4	Deterioro progresivo de componentes de la bomba	6	3	<b>Consecuencia no evidente:</b> deriva en posibles fallas futuros por otras causas	54

Tabla 26: Hoja de Información Sistema Bomba P70



Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias				H1	H2	H3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Estado	Intervalo Inicial
							S1	S2	S3	H4	H5	S4			
F	FF	MF	H	S	E	O	O1	O2	O3						
							N1	N2	N3						
1	1	A	S				S						Tarea programada con sistema en condición	Existente	
1	1	B	S	S			S						Tarea programada con sistema en condición	Existente	
1	2	A	S	N	S		S						Tarea programada con sistema en condición	Existente	
1	2	B	S	N	S		N	N	S				Se recomienda una tarea de revisión programada: considerando que la abrasión es una condición propia de la bomba que se puede ver agravada por malas condiciones en la planta		Inspección: Semestral
1	2	C	N				N	S					Tarea de restauración programada	Existente	

Tabla 27: Hoja de decisión Sistema Bomba P70

## Sistema Bomba P5

Función	Falla Funcional	Modo de Falla	F	Efectos de las fallas	S	D	Consecuencia de las fallas	NPR	
1 Bomba de ácido producto	1 Pérdida de Función	A Desalineamiento	4	1	Daño de acoplamiento con motor	4	4	<b>Operacional:</b> Detención de operaciones por imposibilidad de despachar el ácido acumulado.	64
		B Rotura Sello Mecánico	4	3	Fugas de ácido	9	2	<b>Seguridad:</b> Alta posibilidad de que los trabajadores tengan contacto con ácido a alta concentración. <b>Operacional:</b> Detención de operaciones por rotura y en caso de que se presente un accidente con tiempo perdido	72
	2 Caudal Insuficiente	A Soltura	4	1	Desgaste excesivo de cojinetes, exceso de vibración	7	4	<b>Operacional:</b> Caudal insuficiente implica detención de planta en caso de que el caudal sea menor a la cantidad de ácido producido, condicionado al ácido en estanque B6	112
		B Abrasión	2	2	Desgaste progresivo en impulsor	5	6	<b>Consecuencia no evidente:</b> condición intrínseca de una bomba.	60
		C Desgaste	5	4	Deterioro progresivo de componentes de la bomba	5	3	<b>Consecuencia no evidente:</b> deriva en posibles fallas por otras causas	75

Tabla 28: Hoja de Información Sistema Bomba P5



Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias				H1	H2	H3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Estado	Intervalo Inicial
F	FF	MF	H	S	E	O	S1	S2	S3	H4	H5	S4			
N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3				
1	1	A	S	N	S		S						Tarea programada con sistema en condición: Medición de Vibraciones	Existente	
1	1	B	S	S			S						Tarea programada con sistema en condición: Medición de Vibraciones	Existente	
1	2	A	S	N	S		S						Tarea programada con sistema en condición: Medición de Vibraciones	Existente	
1	2	B	S	N	N	S	N	N	S				Sin Mantenimiento Programado	Faltante	A definir
1	2	C	N				N	S					Tarea de restauración programada	Faltante	Semestral

*Tabla 29: Hoja de decisión Bomba P5*

## Bomba P58

Función	Falla Funcional	Modo de Falla	F	Efectos de las fallas	S	D	Consecuencia de las fallas	NPR	
1 Bomba encargada de entregar en agua potable para dilución, duchas de emergencia y enfriamiento de v10	1 Pérdida de Función	A Desalineamiento	2	1	Daño de acoplamiento con motor	6	4	<b>Operacional:</b> Detención de operaciones por imposibilidad de bombear agua a las torres. No enfriamiento de V10. <b>Seguridad:</b> Riesgo en las personas por la no disponibilidad de agua en las duchas de emergencia	48
		B Rotura Sello Mecánico	3	3	Fugas de ácido	6	2	<b>Operacional:</b> Detención de operaciones por rotura.	36
	2 Caudal Insuficiente	A Soltura	3	1	Desgaste excesivo de cojinetes, exceso de vibración	7	4	<b>Medioambiental:</b> Caudal insuficiente implica no refrigeración de V10 y torres funcionando con concentraciones no adecuadas abriendo la posibilidad de un posible incidente ambiental	84
		B Abrasión	2	2	Desgaste progresivo en impulsor	5	6	<b>Consecuencia no evidente:</b> condición intrínseca de una bomba.	60
		D Desgaste	4	4	Deterioro progresivo de componentes de la bomba	5	3	<b>Consecuencia no evidente:</b> deriva en posibles fallas por otras causas	60

Tabla 30: Hoja de Información Bomba P58



Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias				H1	H2	H3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Estado	Intervalo Inicial
							S1	S2	S3	H4	H5	S4			
F	FF	MF	H	S	E	O	N1	N2	N3						
1	1	A	S	N	S		S						Tarea programada con sistema en condición: Medición de Vibraciones	Existente	
1	1	B	S	N	S		S	N	S				Tarea de descarte programado: Cambiar sellos según las especificaciones del fabricante.	Existente	
1	2	A	S	N	S		S	S					Tarea programada con sistema en condición: Medición de Vibraciones	Existente	
1	2	B	N				N	N	S				Tarea de revisión programada: Inspección para verificar estado del rodete	Faltante	Anual
1	2	C	N				N	N	S				Sin Mantenimiento programado		-

*Tabla 31: Hoja de decisión Bomba P58*

## Bomba P5N

Función o Componente del Servicio		Falla Funcional		Modo de Falla		F	Efectos de las fallas	S	D	Consecuencia de las fallas
1	Bomba encargada de Bombear el ácido desde k5	1	Pérdida de Función	A	Desalineamiento	1	Daño de acoplamiento con motor	4		<b>Operacional:</b> Detención de proceso de fundición
				B	Rotura Sello Mecánico	3	Fugas de ácido	4		<b>Operacional:</b> Detención de proceso de fundición <b>Seguridad:</b> Riesgo de contacto con ácido
		2	Caudal Insuficiente	A	Soltura	1	Desgaste excesivo de cojinetes, exceso de vibración	7		<b>Medioambiental:</b> Remoción deficiente de SO3 <b>Operacional:</b> Desgaste progresivo de PTGC
				B	Abrasión	2	Desgaste progresivo en impulsor	5		<b>Consecuencia no evidente:</b> condición intrínseca de una bomba.
				C	Desgaste	4	Deterioro progresivo de componentes de la bomba	5		<b>Consecuencia no evidente:</b> deriva en posibles fallas por otras causas

Tabla 32: Hoja de Información Bomba P5N



Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias				H1	H2	H3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Estado	Intervalo Inicial
							S1	S2	S3	H4	H5	S4			
F	FF	MF	H	S	E	O	N1	N2	N3						
1	1	A	S	N	S		S						Tarea Programada con sistema en condición: Medición de Vibraciones	Faltante	Mensual
1	1	B	S	S			N	N	S				Tarea de descarte programado	Faltante	Anual
1	2	A	S	N	S		S						Tarea Programada con sistema en condición: Medición de Vibraciones	Faltante	Mensual
1	2	B	N				N	N	S				Tarea de descarte programado: Se recomienda complementar con una actividad de inspección programada	Faltante	Semestral
1	2	C	N				N	N	N	S			Tarea de Búsqueda de fallas programada	Faltante	Bimensual

*Tabla 33: Hoja de decisión Bomba P5N*

## Intercambiador W24

Función		Falla Funcional		Modo de Falla		F	Efectos de las fallas	S	D	Consecuencia de las fallas	NPR
1	Regulación temperatura gases	1	Pérdida total de función	A	Rotura de Carcaza	1	Emisión local	10	4	<b>Medio Ambiental:</b> Emisión local por filtración de gases desde la carcasa. <b>Salud:</b> Riesgo de que las personas cercanas al equipo aspiren los gases mencionados. <b>Operacional:</b> Detención de Proceso Fundición	40
						2					
		2	2	1	Alto consumo de peróxido y emisión por chimenea por efecto bypass	8	7	<b>Medio Ambiental:</b> Alta emisión por chimenea, se cumple norma, pero es una posibilidad de conflicto por el entorno. <b>Operacional:</b> Alto consumo de peróxido, componente que eleva los costos de operación.	112		

Tabla 34: Hoja de Información Intercambiador de Calor W24



Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias				H1	H2	H3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Estado	Intervalo Inicial
F	FF	MF	H	S	E	O	O1	O2	O3	H4	H5	S4			
							N1	N2	N3						
1	A	1	S	S			S						Tarea programada en sistema en condición: Termografía	Existente	Semestral
1	A	2	S	S			S						Tarea programada en sistema en condición: Termografía	Faltante	Semestral

*Tabla 35: Hoja de Decisión Intercambiador de Calor W24*

## Análisis de Resultados

Luego de los estudios realizados a lo largo del presente trabajo, se determina que existen entre todos los equipos 12 modos de fallas predominantes, siendo 10 de estos pertenecientes a las bombas y a los sistemas de bombas y solo dos modos de falla (Rotura de carcasa) corresponden al intercambiador de calor W24.

De las hojas de información y decisión presentadas anteriormente se desprende que gran parte de las posibles fallas que se pueden llegar a presentar en la planta están cubiertas por el plan matriz existente de manera explícita, no obstante, una parte no menor de las acciones no están cubiertas siendo estas las que menos probabilidad tienen de presentarse en la planta, teniendo los modos de falla con acciones faltantes un índice de frecuencia 5 o menor.

Distribución de Acciones

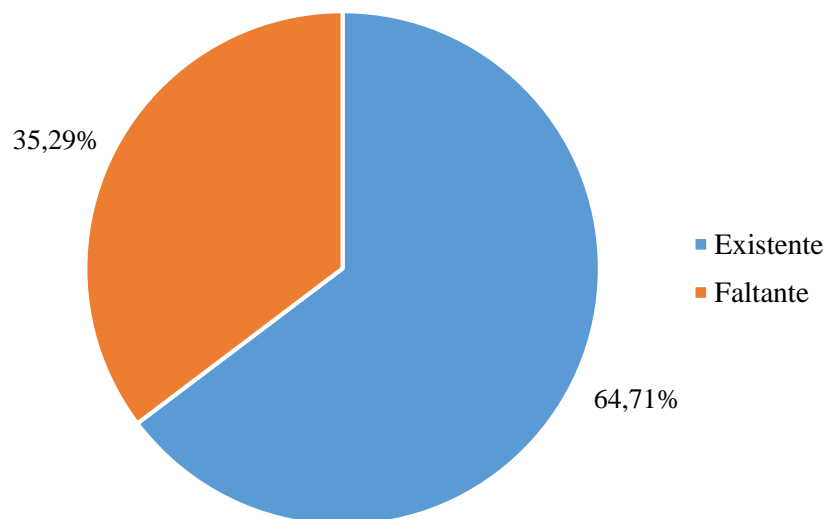


Gráfico 2: Distribución porcentual de acciones existentes y faltantes

Frecuencia	Severidad	Detección
0	3	5

Tabla 36: Acciones faltantes con índices mayores a 5

Sin embargo, se nota que existen 3 modos de falla con acciones faltantes con índice de severidad mayores a 5 todas con bajo índice de frecuencia, esto refleja que el actual plan matriz tiene contempladas las fallas más frecuentes de la planta de ácido, son embargo no incluye fallas que, aunque no tienen mayor probabilidad de falla de presentarse, si pueden traer consecuencias graves tanto desde el punto de vista operacional como medioambiental y seguridad.

También es importante mencionar que todas las acciones relacionadas con mantenimiento en condición o mantenimiento predictivo que se han obtenido como resultado de los análisis realizados se encuentran en el plan matriz existente en la planta.

A nivel de equipos se puede notar de la tabla 36 que el equipo que más modos de falla descubiertos posee es el sistema de bomba P1, esto, dependiendo de la falla, podría no tener una influencia mayor considerando que se encuentra al inicio del proceso de la planta de ácido y los equipos que están en etapas posteriores podrían soportar por cierto período de tiempo.

Tanto en el caso del sistema de bombas P1 y P4 uno de los modos de falla faltantes es la rotura de rodete, esto se explica ya que estas bombas están hechas de polímeros material que es propenso a dañarse por cambios bruscos de temperatura, estos cambios pueden ir poco a poco deformando el rodete disminuyendo al caudal de la bomba y hacerla menos eficiente.

	<b>Existente</b>	<b>Faltante</b>	<b>Acciones</b>
<b>Bomba P1</b>	3	3	6
<b>Bomba P4</b>	4	2	6
<b>Bomba P6</b>	4	1	5
<b>Bomba P70</b>	4	1	5
<b>Bomba P5</b>	3	2	5
<b>Bomba P58</b>	3	2	5
<b>Intercambiador W24</b>	1	1	2

*Tabla 37: Acciones existentes y faltantes por equipo según mantenimiento centrado en confiabilidad*

Un caso particular en la aplicación de RCM se presenta en la bomba P5N, equipo instalado a fines del año 2015 y que a la fecha de la elaboración del presente trabajo no ha presentado ningún tipo de fallas (Razón por la cual la columna de frecuencias se encuentra en blanco), sin embargo, esto no está relacionado con la mantención hecha al equipo debido a que no existen acciones destinadas a este equipo en el plan matriz, por lo que es de suma urgencia que se incluya.

Es importante mencionar que producto de las características propias de RCM en el presente análisis solo se consideran las fallas propias del equipo estudiado, siendo que en la planta gran parte de las fallas están causadas por el efecto de propagación de la falla de otra parte de la planta por lo que las acciones aquí propuestas, aunque deberían disminuir el efecto y/o frecuencia de las fallas, no garantizan que estas se eliminen.

## Recomendaciones

Luego del trabajo desarrollado se pueden determinar las siguientes acciones para mejorar el funcionamiento de la planta.

- Diseñar un plan de mantenimiento asociado a la bomba P5N e incluirlo al plan matriz de la planta.
- Diseñar un plan de mantenimiento a la Planta de Tratamiento de Gases de Cola (PTGC) o planta de peróxido, es importante mencionar que aunque la PTGC está fuera del alcance del presente trabajo a lo largo del desarrollo de este se detectó que la planta no cuenta con un plan de mantenimiento asociado, lo cual es algo sumamente crítico considerando que su propósito es cumplir la normativa ambiental vigente y que es la etapa previa a la salida de los gases a la atmósfera, por lo que una falla en esta podría implicar una detención inmediata de las operaciones además de sanciones por las respectivas autoridades.
- Realizar un estudio referente a los parámetros de utilización de los equipos de la planta para determinar la concordancia de estos con los parámetros de funcionamiento óptimos de los equipos. Este punto es de suma importancia ya que existen diversos equipos en la planta de ácido, que si bien existe una idea por parte de los operadores y mantenedores de los valores a los que se debe trabajar, no tienen un valor establecido de funcionamiento de el o los parámetros que gobiernan la operación del equipo. Una operación fuera de parámetros óptimos no solo causa que los equipos sean menos eficientes, sino que los daña sistemáticamente pudiendo causar una falla generalizada o un accidente tanto laboral como ambiental teniendo como agravante el trabajo con sustancias peligrosas para las personas.
- Diseñar un protocolo de chequeo sistemático de los parámetros de funcionamiento de la planta para los que están definidos actualmente.
- Establecer como protocolo un tiempo límite para incluir a los equipos nuevos en el plan matriz de mantenimiento.
- Aplicar el ciclo de mejoramiento continuo.

## Conclusiones

Una vez planteado y desarrollado el modelo propuesto, además de tener en consideración los resultados obtenidos, se puede decir que el principal potencial de este para su aplicación en la industria radica en la identificación de los equipos principales y sus principales fallas, pero no es el más adecuado para determinar las acciones a implementar en el plan matriz de mantenimiento de los mencionados equipos.

Como se mencionó el principal potencial radica en la identificación de equipos críticos y sus principales fallas, esto se explica porque el modelo involucra tanto a operadores y mantenedores en la determinación de estos, haciendo que ambas partes lleguen a un consenso considerando factores que de tratarse individualmente no se habrían tenido en cuenta obteniéndose resultados inadecuados.

Sin embargo, el modelo no es el más adecuado para la determinación de acciones a incluir en el plan matriz, esto se debe principalmente a la forma a la que se aplicó y al contexto de la planta estudiada. El modelo se aplicó de forma cualitativa por lo cual en el momento de trabajar con el árbol de decisiones pueden no haberse tomado las decisiones adecuadas, respecto al contexto de la planta para el correcto funcionamiento del modelo es necesario que la planta tenga un funcionamiento estable, ya que el mantenimiento centrado en confiabilidad al funcionar bajo el concepto de falla funcional solo considera en las posibles fallas de los equipos las que son por causas propias del funcionamiento de esta, dejando fuera fallas que se puedan producir por propagación de eventos en otras instancias del proceso.

Otra acotación importante en la aplicación del modelo planteado radica en que no es aplicable para equipos que se hayan instalado de forma reciente, ya que es necesario que las personas que estén involucradas en la práctica de RCM tengan un conocimiento pleno conocimiento del equipo estudiado en el contexto en el cual se está operando.

A lo largo del desarrollo del modelo se obtiene valiosa información que está fuera de lo que se necesita para su aplicación como tal, esto ya que a medida que se realizan las reuniones con el personal implicado es usual que se descubran diversas falencias y/o malas prácticas presentes en la planta que deben ser tratadas para que exista una buena operación a través del tiempo.

Para finalizar se puede decir que la principal forma de agregar valor a la planta en donde se aplique el modelo es a través del levantamiento de información referentes a cuales son los equipos críticos y sus principales fallas, además de la identificación de las malas prácticas y falencias al momento de operar y mantener, si esto se trata junto con una evaluación económica detallada al momento de utilizar el árbol de decisiones el modelo planteado puede beneficiar de manera significativa el mantenimiento de la planta donde sea aplicado.



## **Bibliografía**

Bizcaia, D. F. (s.f.). *AMFE: Análisis Modal de Fallas y Efecto*. Bilbao: Librería Hor Dago.

Chile, D. O. (Jueves 12 de Diciembre de 2013).

Diario Oficial de la República de Chile. (Jueves 12 de Diciembre de 2013). Santiago, Chile.

Diputación Foral de Bizcaia. (s.f.). *AMFE: Análisis Modal de Fallas y Efectos*. Bilbao: Librería Hor Dago.

Moubray, J. (1991). *Mantenimeinto Centrado en Confiabilidad*. Biddles Ltd.

Pablo Viveros, R. S. (2012). Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo. *Revista Chilena de Ingeniería*, 125-138.