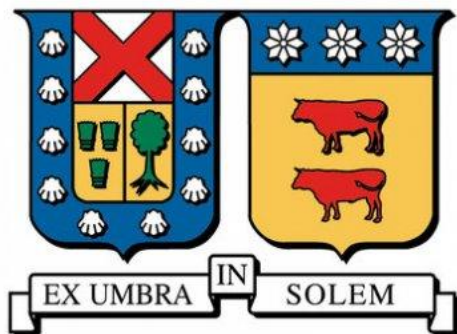




UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL INDUSTRIAL

PLAN DE MEJORAMIENTO ASOCIADO A LAS PARADAS DE PLANTA
PARA PROCESO DE ÁCIDO SULFÚRICO DE CODELCO VENTANAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

AUTOR
EZEQUIEL ALEJANDRO CAMUS ARAYA

PROFESOR GUÍA
FREDY KRISTJANPOLLER

VALPARAÍSO DE CHILE, JUNIO, 2017

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a Jehová por darme la paciencia y vigor para dar término a este proceso.

A mi madre Cecilia y mi padre Guillermo por su cariño y apoyo incondicional.

A mi hermana Andrea y hermano Rodrigo por sus consejos y enseñanzas.

A mis amigos quienes me acompañaron en incontables situaciones de pena y alegría.

Al profesor Fredy Kristjanpoller por ser mi guía en esta última travesía.

A todos, muchas gracias.

Ezequiel A. Camus Araya.

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo de título, tiene como objetivo principal elaborar un plan de mejoramiento asociado a la parada de la planta de ácido sulfúrico de la empresa Codelco Ventanas para su mantenimiento, considerando las mejoras propuestas por Vásquez (2016).

Para ello, el estudio inicia con la presentación de la planta de ácido, la cual permite captar y limpiar los gases provenientes desde fundición, además de producir ácido sulfúrico el cual tiene un papel protagónico en el proceso productivo de cátodos de cobre. Lo anterior, incita a suponer la gran relevancia que tiene para Codelco Ventanas el correcto funcionamiento de la planta y con ello, la importancia de asegurar la disponibilidad de la misma. Por esta razón, la empresa adopta como estrategia la detención de la planta para su mantenimiento, la cual se realiza cada 12 meses brindando la oportunidad única de intervenir aquellos equipos que normalmente no están disponibles durante la operación normal.

Comprendida la importancia de realizar la detención de la planta para su mantenimiento, se presenta y analiza la situación actual mediante la cual es realizada la parada. Lo anterior, permite conocer la forma en que la empresa jerarquiza sus activos mediante la metodología de Criticidad total por riesgos, estima el presupuesto mediante analogía, programa las actividades de la parada utilizando la técnica PERT y controla el alcance, cronograma y presupuesto del proyecto a través del Earned Value Management.

Posteriormente, se procede a diagnosticar la situación actual de parada, validando las metodologías presentadas y a la vez, detectando necesidades las cuales precisan ser cubiertas. Por una parte, no se distingue una propuesta clara que explique qué acción

diferencial se debe realizar sobre los activos, de tal modo priorizar y focalizar esfuerzos en aquellos equipos con mayor criticidad. Por otro lado, se detecta la ausencia de medidas preventivas que permitan atender eventos no esperados y que al mismo tiempo, disminuyan la incertidumbre propia del proyecto. De este modo, surge la necesidad de generar un plan de acción de mantenimiento y un plan de gestión de riesgos.

Para llevar a cabo el plan de acción de mantenimiento, se implementa el análisis de causa raíz (ACR) sobre los activos críticos de la planta. Para ello, se conformó un equipo multidisciplinario de trabajo los cuales dan inicio al ACR discutiendo cuál es el principal problema que ha surgido de manera reiterativo en el activo bajo análisis y la forma en que este se ha manifestado, de tal manera, generar un conjunto de hipótesis las cuales serán validadas o refutadas en base a los antecedentes registrados. Lo anterior, permitió conducir el estudio hacia la causa raíz del evento no deseado y así, elaborar acciones correctivas las cuales forman parte del plan de acción de mantenimiento.

Por otra parte, utilizando la metodología que ofrece el PMI, se elaboró un plan de gestión de riesgos, en donde al igual que antes, se conformó un equipo de trabajo multidisciplinario, los cuales planificaron la forma en que se gestionaran los riesgos e identificaron, analizaron y generaron respuesta a la ocurrencia de potenciales eventos riesgosos, así, una vez terminado el plan de gestión de riesgo, este se fue validado por la jefatura del área de proyectos.

Finalmente, mencionar que las medidas adoptadas no pretenden ser la solución definitiva a los problemas que conlleva realizar la parada de una planta, sino, buscan aportar herramientas que permitan agregar valor de manera progresiva a la gestión de los recursos involucrados en un evento de esta magnitud.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	12
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo General	15
2.2	Objetivos Específicos	15
3	MARCO TEÓRICO	16
3.1	Antecedentes Generales.....	16
3.2	Antecedentes Específicos	18
3.3	Proceso Productivo.....	18
3.3.1	Chancado.....	19
3.3.2	Molienda	20
3.3.3	Flotación.....	22
3.3.4	Fundición	22
3.3.5	Electrorrefinación	24
3.3.6	Lixiviación	25
3.3.7	Electroobtención.....	27
3.3.8	Exportación	28
3.4	Planta de Ácido Sulfúrico	29
3.4.1	Captación y manejo de gases	31

3.4.2	Lavado de gases.....	31
3.4.3	Secado de gases	32
3.4.4	Conversión de anhídrido de azufre	32
3.4.5	Absorción del óxido de azufre.....	33
3.4.6	Enfriamiento de agua	33
3.5	Mantenimiento	34
3.5.1	Mantenimiento Correctivo	35
3.5.2	Mantenimiento Preventivo	35
3.5.3	Mantenimiento Predictivo	36
3.6	Confiabilidad y Disponibilidad.....	36
3.6.1	Confiabilidad	36
3.6.2	Disponibilidad	37
3.7	Parada de planta	38
3.8	Herramientas de Gestión	40
3.8.1	Dirección de Proyectos	40
3.8.2	Work Breakdown Structure (WBS).....	40
3.8.3	Earned Value Management (EVM).....	41
4	METODOLOGÍA	42
5	PARADA DE PLANTA CODELCO VENTANAS	46
5.1	Equipos en Planta de ácido Sulfúrico.....	47

5.1.1	Jerarquización de activos	48
5.2	Actividades realizadas en la parada de Planta de Codelco Ventanas.....	51
5.2.1	Actividades predecesoras y tiempos de ejecución.....	52
5.2.2	Diagrama PERT y Ruta Crítica	54
5.3	Control de las actividades de la Parada de Planta mediante EVM	56
5.3.1	Estimación de costos.....	56
5.3.2	Valor Planificado	57
5.3.3	Valor Ganado	59
5.3.4	Costo real	59
6	ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DE LA PARADA DE PLANTA	60
6.1	Análisis de la Jerarquización de Activos.....	61
6.2	Diagnóstico de la Jerarquización de Activos.....	62
6.3	Análisis del Programa y del Control de las Actividades	64
6.4	Diagnóstico del Programa y del Control de las Actividades	66
7	DESARROLLO DE LAS PROPUESTAS	70
7.1	Metodología del plan de acción de mantenimiento.....	70
7.1.1	Análisis de Causa Raíz.....	71
7.1.2	Análisis de Modos y Efectos de Falla.....	72
7.1.3	Análisis de Modos de Falla, Efectos y Criticidad	73
7.2	Desarrollo del plan de acción de mantenimiento	74

7.2.1	Soplador V10.....	75
7.2.2	Filtro de Velas	77
7.2.3	Torre de absorción K5	80
7.2.4	Precipitador Miljo	82
7.2.5	Torre post-secado K4.....	85
7.3	Metodología del plan de gestión de riesgos.....	89
7.3.1	Planificación de la gestión de los riesgos	89
7.3.2	Identificar los riesgos.....	90
7.3.3	Análisis de riesgos	91
7.3.4	Plan de respuesta a los riesgos	92
7.3.5	Control de riesgos.....	92
7.4	Desarrollo del plan de gestión de riesgos	94
7.4.1	Planificación de la gestión de los riesgos	95
7.4.2	Identificar los riesgos.....	98
7.4.3	Análisis de riesgos	99
7.4.4	Plan de respuesta a los riesgos	107
7.4.5	Control de riesgos.....	110
8	CONCLUSIONES	111
9	REFERENCIAS	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Diagrama de Flujo del Proceso Productivo	28
Figura N° 2: Proceso Productivo	29
Figura N° 3: Esquema de Equipos de Planta de Ácido Sulfúrico	34
Figura N° 4: Metodología de Trabajo	45
Figura N° 5: Diagrama PERT	55
Figura N° 6: Curva S del Proyecto	58
Figura N° 7: Análisis y diagnóstico jerarquización de activos	64
Figura N° 8: Beneficios, requerimientos y plazos para el plan de acción	64
Figura N° 9: Análisis y diagnóstico del programa y control de actividades.....	69
Figura N° 10: Beneficios, requerimientos y plazo para el plan de riesgo	69
Figura N° 11: ACR soplador V10	77
Figura N° 12: ACR filtro de velas	79
Figura N° 13: ACR torre de absorción K5.....	82
Figura N° 14: ACR precipitador miljo	84
Figura N° 15: ACR torre post-secado K4.....	87
Figura N° 16: Metodología plan de gestión de riesgo	93
Figura N° 17: Diagrama de validación del plan de riesgos	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1 Composición de gases de fundición de cobre	30
Tabla N° 2 Principales polvos contaminantes.....	30
Tabla N° 3 Especificación Ácido Producto	31
Tabla N° 4: Equipos que componen planta de ácido sulfúrico Codelco Ventanas ..	48
Tabla N° 5: Matriz de Criticidad	49
Tabla N° 6: Jerarquización de activos modelo criticidad por riesgo	50
Tabla N° 7: Matriz de criticidad de Equipos.....	50
Tabla N° 8: Lista de actividades Parada de Planta Codelco Ventanas	52
Tabla N° 9: Actividades predecesoras y tiempos de ejecución.....	53
Tabla N° 10: Ruta de Actividades	54
Tabla N° 11: Estimación de Costos.....	57
Tabla N° 12: Valor Planificado	58
Tabla N° 13: Descripción árbol lógico de ACR.....	72
Tabla N° 14: Comparación entre metodologías para análisis de puntos débiles	73
Tabla N° 15: Resultados ACR	88
Tabla N° 16: Escala de probabilidad cualitativa	95
Tabla N° 17: Matriz de escala impacto positivo	96
Tabla N° 18: Matriz de escala de impacto negativo.....	96
Tabla N° 19: Matriz de riesgo Oportunidades y Amenaza	97
Tabla N° 20: Resumen estrategias de oportunidades	97
Tabla N° 21: Resumen estrategias de amenazas	98

Tabla N° 22: Identificación de riesgos	98
Tabla N° 23: Priorización de eventos riesgosos.....	105
Tabla N° 24: Escala de probabilidad cuantitativa	105
Tabla N° 25: Reserva para contingencias	106
Tabla N° 26: Plan de respuesta al riesgo	109

1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La actividad del mantenimiento, desde la revolución industrial y más recientemente en la época de crecimiento de los servicios ha evolucionado mucho en la actividad empresarial, pero en los estudios realizados se evidencia que aún no ocupa el lugar que le corresponde en los procesos de las entidades de producción y servicios (Rodríguez, 2010), a pesar de que “se reconoce que la función de mantenimiento aporta valor a la organización productiva cuando esta es realizada de forma adecuada” (Cabeza, Cabeza, y Corredor, 2010). Es así, que “el mantenimiento empieza a adquirir importancia a partir de los años 30 cuando Henry Ford implementó en su empresa un área destinada a las actividades de reparación de los equipos pertenecientes a su sistema de producción” (Olarte, Botero, y Cañon, 2010).

Bajo el contexto mundial competitivo actual, las organizaciones productoras poseen una unidad de gestión de mantenimiento industrial, “encargada de determinar los objetivos y las prioridades de mantenimiento, además de las estrategias y responsabilidades” (Viveros, Kristjanpoller, Barbera, y Crespo, 2013) ya que la “función de mantenimiento no es solamente reconocida como una necesidad, sino también como una estrategia de negocios, una ventaja competitiva” (Quintana, Pisani, y Casal, 2015) es decir, “el mantenimiento pasa a convertirse en un Factor Estratégico de diferenciación” (Arata, 2008).

Con el paso de los años, los empresarios han entendido la importancia que tiene el correcto funcionamiento de los equipos que participan en los sistemas de producción con respecto a las ganancias de sus organizaciones. Por tal motivo invierten parte de sus

recursos para mejorar su área de mantenimiento contratando personal altamente calificado que planifique actividades de prevención y detección de fallas que les permita garantizar la operación óptima de su proceso de producción facilitando con esto, el éxito del sistema de gestión y evitando pérdidas en materias primas y paradas de producción (Olarte et al., 2010).

A pesar de las medidas adoptadas en la actualidad basada los conceptos de confiabilidad y disponibilidad, industrias como la azucarera, petroquímica, petróleo y refinería, se ven obligadas a efectuar la detención de los equipos más importantes del proceso productivo. Son estos eventos los que se conocen como paradas de planta y corresponden a instancia en que se “provee la oportunidad única para intervenir los activos que normalmente no están disponibles durante la operación normal o que lo están es un breve o escaso periodo” (Amendola, 2005).

El objetivo de toda empresa que adopta como estrategia una parada de planta, es lograr la máxima disponibilidad de sus instalaciones en la etapa de uso y reducir al mínimo el tiempo y los recursos invertidos en la ejecución de la parada. Sin embargo, hoy son muchos casos en que se aprovecha una parada de planta para hacer tareas que podrían hacerse, sin perjuicio alguno, durante periodos de operación (Pistarelli, 2013).

Con lo anterior, Amendola, (2005) agrega además que el necesario balance que se debe realizar, entre percutir lo menos posible la producción de la empresa, pero al mismo tiempo efectuar todas las reparaciones o acciones pendientes en tiempos y costes razonables, es algo que requiere de un gran esfuerzo y un excelente trabajo en equipo. En

muchas empresas se producen notorios fracasos, donde los costes originalmente pensados son superados, o los tiempos se prolongan más allá de lo esperado.

Sin ir más lejos, la empresa de refinería Codelco Ventanas en la actualidad adopta la estrategia anteriormente descrita en su planta de ácido sulfúrico, planta crítica dentro del proceso productivo de refinación. Este evento que año a año trae consigo altos costos de ineficiencia debido a la no producción de la empresa, incita a pensar si es que el uso de los recursos está siendo gestionado de manera eficiente. Dado que Codelco Chile es una empresa estatal, es de sumo interés conocer si la empresa lleva a cabo de forma eficiente la parada de planta y en caso de no hacerlo, generar medidas que permitan marcar un rumbo para posicionar a la empresa dentro de la llamada World Class Performance.

En base a lo anterior y considerando que la gestión del mantenimiento juega un rol de suma importancia dentro de la industria productora de nuestro país e impacta en forma directa la rentabilidad del negocio, la formulación de la problemática se traduce en responder la pregunta, ¿Es posible generar un plan de mejoramiento para la parada de planta de ácido sulfúrico de la empresa Codelco Ventanas que permita gestionar eficiente los recursos involucrados en este gran evento?

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Generar un plan de mejoramiento asociado a la parada de la planta de ácido sulfúrico de Codelco Ventas a través de acciones específicas de mantenimiento y de respuesta al riesgo para aumentar la eficiencia en la gestión de recursos.

2.2 Objetivos Específicos

- Recopilar y organizar información bibliográfica orientada a conocer el proceso productivo de Codelco y metodologías, técnicas y herramientas aplicables en la parada de una planta para su mantenimiento.
- Recopilar y organizar antecedentes relacionados a la situación actual mediante la cual es ejecutada la parada de planta de ácido de Codelco Ventanas.
- Analizar y diagnosticar técnicas, herramientas y metodologías implementadas en la actualidad en la parada de la planta de Codelco.
- Generar un plan de acción de mantenimiento y un plan de gestión de riesgos para el evento de parada.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Antecedentes Generales

Para conocer el contexto en el cual se desenvuelve la empresa en donde se plantea llevar a cabo la presente investigación, es preciso conocer aspectos generales de la misma, así, identificar sus objetivos en el corto y largo plazo para que las soluciones aquí propuestas se encuentren en línea con los objetivos dispuestos por el directivo.

Corporación Nacional del Cobre de Chile (Codelco) es una “empresa autónoma del estado chileno, principal productora de cobre de mina del mundo, líder en reservas del mineral a nivel planetario y motor del desarrollo del país” (Codelco, 2015).

Su negocio principal: explorar, explotar y comercializar los recursos mineros del cobre refinado y sus subproductos. Lo anterior, se realiza a través de siete divisiones: Andina, Chuquicamata, El Teniente, Gabriela Mistral, Ministro Hales, Radomiro Tomic y Salvador, a las que se suma la Fundición y Refinería Ventanas. La estrategia corporativa es coordinada y encabezada desde la Casa Matriz ubicada en Santiago de Chile, por el directorio formado por nueve integrantes y la presidencia ejecutiva (Codelco, 2015).

Así, el cobre fino y sus derivados llegan a clientes en todo el planeta, lo que convierte a Codelco en responsable de un quinto de las exportaciones nacionales. El principal mercado es Asia, seguido por Europa y Sudamérica. Todos los aportes de la empresa se entregan al estado, los que suman en sus 45 años de historia más de US\$104 mil millones. Hasta diciembre de 2015 Codelco posee activos por US\$33.443 millones y un patrimonio que asciende a US\$9.732 millones (Codelco, 2015).

Entre los ejes de la actual gestión está convertirse en una de las empresas mineras más competitivas. En 2015 logró quedar en el segundo cuartil de costos, es decir, a pertenecer a la mitad de las empresas con los menores costos de la industria. Ahora la meta es mantenerse en ese lugar o, incluso, llegar al primer cuartil de costos. Esta meta es crucial, especialmente hoy, cuando han impulsado un Plan de Inversiones de más de US\$20 mil millones para el quinquenio 2015-2019, con seis proyectos que extenderán la vida de empresa, y elevarán su productividad. Este inédito programa de inversiones será ejecutado con recursos de todos los chilenos, lo que obliga a la empresa a ser eficientes en la construcción de los proyectos, tanto en los tiempos comprometidos como en la ejecución de los presupuestos, misma razón por la que es indispensable la búsqueda de estándares de clase mundial (Codelco, 2015).

Finalmente, por medio de los antecedentes generales presentados, se desprende que la empresa en sus distintas divisiones está en busca de eficiencia en su actividad y estándares World Class. Lo anterior, con el objeto de posicionarse en el mercado nacional y mundial como una empresa minera integral que es capaz de gestionar en forma eficiente los recursos asignados por el estado chileno. Esto refuerza el presente estudio de investigación, ya que la parada de planta es un evento que demanda una gran cantidad de recursos, activos, tiempo, entre otros, y que a su vez genera ventaja competitiva frente a las demás empresas del mercado.

3.2 Antecedentes Específicos

La división de Codelco en donde se llevará a cabo el desarrollo de la problemática planteada es la división Ventas. Por lo anterior, es preciso conocer aspectos más específicos de la misma.

Codelco División Ventanas es una fundición y refinería en donde se procesan los concentrados de cobre, para producir principalmente, ánodos y cátodos, producto que está considerado entre los tres mejores a nivel mundial, alcanzando una pureza de 99,99%, entregando de esta manera mayor valor agregado al principal recurso minero del país. Junto a ello, la división produce ácido sulfúrico el cual es utilizado en su propio proceso productivo y al mismo tiempo comercializado. La división cuenta con una capacidad anual de producción de 420.000 toneladas en su fundición, 400.000 toneladas en su refinería y 360.000 toneladas de ácido sulfúrico, lo que se tradujo para el año 2015 en ingresos por US\$11.694 millones (Codelco, 2015).

Con lo anterior será de interés mostrar cómo se lleva a cabo el proceso productivo dentro de la división para generar una visión más completa acerca de cómo es elaborado el producto principal de la empresa y con lo mismo identificar en que parte del proceso productivo se encuentra la planta de ácido sulfúrico que será finalmente el área bajo estudio.

3.3 Proceso Productivo

Para identificar en que etapa del proceso productivo toma protagonismo la planta de ácido sulfúrico de la empresa, es necesario presentar y describir las fases mediante las

cuales el cobre es transformado desde su llegada a la división Ventanas en formar de rocas mineralizadas, hasta el momento de venta como cátodo de cobre con un 99,99% de pureza.

En primer lugar, es preciso conocer que existen dos zonas con características diferentes desde las cuales es posible extraer el material mineralizado: la zona de sulfuros y la zona de óxidos y que dependiendo de esta, se determina la manera de explotar el mineral.

La zona de sulfuros corresponde a la mineralización original del yacimiento, también llamada primaria. Los sulfuros contienen minerales formados por combinaciones de cobre, hierro y azufre los que otorgan a las rocas un aspecto metálico. Por otro lado, la zona de óxidos se encuentra en la superficie del yacimiento o cerca de ella, y contiene óxidos de cobre los que típicamente tienen un color verde o azul, los cuales se han formado por acción del oxígeno y otros agentes que atacan las rocas mineralizadas.

Para el caso de minerales sulfurados, deben pasar primero por el chancado y la molienda, posteriormente a un proceso de flotación para luego ser fundidos y finalmente electrorefinados. Mientras que en el caso de minerales oxidados, el proceso productivo implica pasar por el chancado, posteriormente someter el material a una solución de lixiviación, luego a un proceso de extracción con solventes y finalmente a un sistema de electroobtención. En ambos casos, como resultado final, se obtienen cátodos de cobre con 99,99% de pureza.

3.3.1 Chancado

El mineral proveniente de la mina presenta una granulometría variada, desde partículas de menos de 1 milímetro hasta fragmentos mayores a 1 metro de diámetro, por lo que el objetivo del proceso de chancado, es reducir el tamaño de los fragmentos hasta

obtener un tamaño uniforme máximo de 0,5 pulgadas, permitiendo así el posterior proceso de molienda y lixiviación en pilas de manera eficiente. De este modo, para lograr el tamaño deseado, se utilizan equipos eléctricos de grandes dimensiones llamados chancadores, los cuales están contruidos de una aleación especial de acero de alta resistencia y que mediante movimientos vibratorios trituran las rocas.

Los chancadores se alimentan por la parte superior y descargan el mineral chancado por su parte inferior a través de una abertura graduada de acuerdo al diámetro requerido. Todo el manejo del mineral en la planta, se realiza mediante correas transportadoras, desde la alimentación proveniente de la mina hasta la entrega del mineral chancado a la etapa siguiente. Este proceso utiliza la combinación de tres equipos en línea, que van reduciendo el tamaño de los fragmentos en tres etapas sucesivas, las que se conocen como etapa primaria, secundaria y terciaria, las cuales a su vez, reducen el tamaño máximo del material mineralizado en fragmentos de 8, 3 y 0,5 pulgadas de diámetro respectivamente.

3.3.2 Molienda

Una vez que el material mineralizado ha alcanzado el tamaño de 0,5 pulgadas de diámetro en el proceso de chancado, es enviado mediante correas transportadoras al proceso de molienda. El objetivo que tiene este proceso, es continuar la reducción del tamaño de las partículas que componen el mineral, para obtener una granulometría máxima de 0,18 milímetros. De tal modo, para lograr este objetivo, se utilizan grandes equipos giratorios o molinos los cuales poseen una estructura cilíndrica y que son utilizados de dos formas diferentes conocidas como molienda convencional y molienda semiautógena (SAG).

La molienda convencional, se realiza en dos etapas utilizando en la primera un molino de barras y en la segunda un molino de bolas. El molino de barras posee en su interior barras de acero de 3,5 pulgadas de diámetro que son los elementos de molienda los cuales giran con el material proveniente del chancador terciario. De este modo, el material se va moliendo por la acción del movimiento de las barras que se encuentran libres y que caen sobre el mineral. El material molido continúa el proceso, pasando en línea al molino de bolas, el cual en su interior posee bolas de acero de 3,5 pulgadas de diámetro encargadas de llevar a cabo la molienda. Finalmente, en un proceso de aproximadamente 20 minutos, el 80% del mineral es reducido a un tamaño máximo de 0,18 milímetros.

Por otro lado, en la molienda SAG, el mineral se recibe directamente desde el chancador primario y se mezcla con agua y cal. De este modo, el tamaño del material mineralizado en el interior del molino, es reducido producto de la colisión de las partículas del material consigo mismo y a su vez, la acción de numerosas bolas de acero de 5 pulgadas de diámetro, las cuales son lanzadas en caída libre cuando el molino gira, logrando un efecto conjunto de chancado y molienda más efectivo y con menor consumo de energía por lo que, al utilizar este equipo, no se requieren las etapas de chancado secundario ni terciario. Finalmente, la mayor parte del material molido en el SAG tiene la granulometría requerida.

Una vez terminado el proceso de molienda, se procede a agregar agua en cantidades suficientes para formar un fluido lechoso, al cual se le añaden los reactivos necesarios para realizar el proceso siguiente de flotación.

3.3.3 Flotación

Una vez obtenida la mezcla proveniente del proceso de molienda, se envía por medio de correas transportadoras a la siguiente etapa, la flotación, que corresponde a un proceso físico-químico que permite la separación de los minerales sulfurados de cobre del resto de los minerales que componen la mayor parte de la roca original.

De este modo, la pulpa proveniente de la molienda, que tiene ya incorporados los reactivos necesarios para el proceso de flotación, se introduce en unos receptáculos que poseen la forma de piscinas, los cuales son llamados celdas de flotación. Desde el fondo de las celdas, se hace burbujear aire y se mantiene la mezcla en constante agitación para que el proceso sea intensivo. Así, las burbujas arrastran consigo los minerales sulfurados hacia la superficie, donde rebasan por el borde de la celda hacia canaletas que las conducen hacia estanques especiales, desde donde esta pulpa es enviada a la siguiente etapa. El proceso anterior, es reiterado en varios ciclos, de manera de generar un producto cada vez más concentrado el cual, al término de los ciclos, ha aumentado su pureza inicial desde un 1% original en la roca, hasta un 31%. Finalmente, el concentrado es secado mediante filtros hasta obtener entre un 8% y 10% de humedad y posteriormente, llevado al proceso de fundición.

3.3.4 Fundición

El concentrado de cobre seco obtenido del proceso de flotación, se somete a procesos de pirometalurgia en hornos a grandes temperaturas, mediante los cuales el concentrado es transformado en cobre metálico y separado de los otros minerales como hierro, azufre y sílice. De este modo, se logra que la pureza inicial del 31% contenida en el

concentrado, se incrementa progresivamente hasta el 99,7%. Para lo anterior, el proceso de función se realiza en cuatro etapas consecutivas: muestreo, fusión, conversión y pirometallización.

La primera etapa por la que debe pasar el concentrado de cobre, es la de muestreo, ya que normalmente se trabaja con concentrados de diferentes procedencias, y por ende, es necesario clasificarlos de acuerdo a la concentración de cobre, hierro, azufre, sílice y porcentaje de humedad que tengan. Esta última información es fundamental para iniciar el proceso de fusión, ya que el contenido máximo de humedad es de 8%, pues, con valores superiores, el concentrado se comporta como barro difícil de manipulación y exige más energía para la fusión. Así, de acuerdo con los resultados de concentración de cobre, el material se almacena en silos, desde donde se despacha a los hornos de fundición de acuerdo a las mezclas que se determinen.

En la fusión, el concentrado de cobre es sometido a temperaturas de 1.200 grados Celsius para lograr el cambio de estado de sólido a líquido, de tal modo, los elementos que componen los minerales presentes en el concentrado, se separan según su peso, quedando los más livianos en la parte superior del fundido los cuales son llamados escoria y que son enviados de vuelta a hornos de reverberos para recuperar el contenido de cobre que aún queda, mientras que el cobre, que es más pesado se concentra en la parte baja y recibe el nombre de metal blanco. De esta forma es posible separar ambas partes vaciándolas por vías distintas. El proceso anterior, es realizado en el Convertidor Teniente (CT), horno basculante, formado por un cilindro metálico de 5 metros de diámetro por 22 metros de largo, dispuesto en posición horizontal y revestido por ladrillos refractarios en su interior, el

cual está montado sobre un sistema de cremalleras que le permiten oscilar, realizando en una sola operación la fusión y la conversión.

Posteriormente, mediante el proceso de conversión, se tratan los productos obtenidos en la fusión, para obtener cobre de alta pureza. Para esto, se utilizan hornos convertidores convencionales llamados Peirce-Smit, los cuales procesan separadamente el cobre proveniente del horno de reverbero y el metal blanco proveniente del CT. Este, es un proceso cerrado, en donde la misma carga es tratada y llevada hasta el final, sin realizar recarga de material. Así, finalmente se obtiene cobre blíster, con una pureza de 96%.

Finalmente, mediante la pirorrefinación o refinación a fuego, se incrementa la pureza del cobre blíster obtenido de la conversión, eliminando el porcentaje de oxígeno presente, llegando a niveles de pureza del 99,7 %. Este proceso, somete al cobre blíster a una etapa final de refinación en un horno basculante, mediante la introducción de troncos de eucaliptus, en donde, la ignición de la madera permite captar el oxígeno que contiene el cobre blíster como impureza y lo transforma en dióxido de carbono, el cual es liberado a la atmósfera. De esta manera, la pureza del cobre se incrementa a 99,7% y el producto se denomina cobre refinado a fuego (RAF), el cual es moldeado en forma de placas gruesas, llamados ánodos y que tienen un peso aproximado de 225 kilogramos. Posteriormente, los ánodos son enviados al proceso de electrorrefinación o vendidos directamente.

3.3.5 Electrorrefinación

Una vez que se cuenta con los ánodos de cobre obtenidos del proceso de fundición, se da paso al proceso de electrorrefinación, el cual tiene como objetivo eliminar las impurezas que dañan las propiedades eléctricas y mecánicas del cobre, además de separar

las impurezas valiosas del metal. Este proceso, se basa en las características y beneficios que ofrece el fenómeno químico de la electrólisis.

El proceso de electrorrefinación, se lleva a cabo en celdas electrolíticas en las cuales se pone de manera alternada un ánodo de cobre blíster y una lámina muy delgada de cobre puro en una solución de ácido sulfúrico y agua. Así, a esta instalación se le aplica una corriente eléctrica continua de baja intensidad, que hace que se disuelva el cobre del ánodo y se deposite en la lámina de cobre inicial. Este proceso se mantiene durante 20 días, en donde el día 10, se extraen los cátodos y se reemplazan por otros, mientras que los ánodos se dejan 10 días más. De esta manera, al final del día 20, nuevamente se extraen los cátodos y se renuevan los ánodos. Lo anterior, permite refinar el cobre anódico, obteniendo cátodos de cobre con pureza del 99,99%, los cuales son altamente valorados en el mercado.

3.3.6 Lixiviación

Como fue explicado al inicio del apartado, los procesos por los cuales deben ser sometidos los minerales oxidados y sulfurados son diferentes, por ende, una vez que el mineral oxidado ha pasado por la etapa de chancado, el tamaño del material es suficiente para ser llevado mediante correas transportadoras hacia el lugar donde se formarán pilas de material para iniciar la lixiviación, proceso hidrometalúrgico que permite obtener el cobre de los minerales oxidados que lo contienen, aplicando una solución ácida. De este modo, durante el trayecto, el material es sometido a una primera irrigación con una solución de agua y ácido sulfúrico, conocido como proceso de curado, de manera de iniciar ya en el camino el proceso de sulfatación del cobre contenido en los minerales. En su destino, el mineral es descargado mediante un equipo esparcidor de gran tamaño, que lo va

depositando ordenadamente formando un montón de sección trapezoidal con altura de entre 6 a 8 metros, la cual es llamada pila de lixiviación.

En la superficie de la pila, se instala un sistema de riego por goteo y aspersores que van vertiendo lentamente una solución ácida de agua con ácido sulfúrico, la cual va infiltrándose hasta la base de la pila, produciendo la rápida disolución del cobre contenido en los minerales oxidados, formando de esta manera una solución de sulfato de cobre, la que es recogida por el sistema de drenaje, el cual fue instalado previamente bajo la pila de lixiviación y sobre una membrana impermeable. Así, las soluciones que se infiltran a través del material son llevadas en canaletas impermeabilizadas hacia fuera del sector de la pila. La lixiviación, se mantiene por 45 a 60 días, después de lo cual se supone que se ha agotado casi completamente la cantidad de cobre a lixiviar. De este modo, el material restante o ripio es transportado mediante correas transportadoras a botaderos donde se podría reiniciar un segundo proceso de lixiviación para extraer el resto de cobre.

De la lixiviación, se obtienen soluciones de sulfato de cobre con concentraciones de hasta 9 gramos por litro denominadas PLS, las que son llevadas a diversos estanques donde se eliminan las partículas sólidas que pudieron ser arrastradas. Una vez limpia la solución, es llevada a la planta de extracción por solvente, en donde se mezcla con una solución de parafina y resina orgánica. De esta reacción, se obtiene por un lado un complejo resina-cobre y por otro una solución empobrecida en cobre que se denomina refino, la que se reutiliza en el proceso de lixiviación. Finalmente, el compuesto de resina-cobre es tratado en forma independiente con una solución electrolítica rica en ácido, la que provoca la descarga del cobre desde la resina, mejorando la concentración del cobre hasta llegar a 45 gramos por litro, solución que posteriormente se lleva a la planta de electroobtención.

3.3.7 Electroobtención

Obtenida desde el proceso de lixiviación la solución electrolítica que contiene el cobre en forma de sulfato de cobre, el cual ha sido concentrado mediante un circuito de extracción por solventes, se da paso a la etapa de electroobtención, la cual corresponde a un proceso de electrometalurgia en donde se hace circular una corriente eléctrica de baja intensidad por un circuito formado por un ánodo, la solución de sulfato de cobre y un cátodo. Este proceso tiene como objetivo, recuperar el cobre que se encuentra concentrado en la solución y de este modo, producir cátodos de cobre de alta pureza.

Para lograr el objetivo anteriormente mencionado, la solución de sulfato de cobre es llevada a pequeñas piscinas que reciben el nombre de celdas de electroobtención, las cuales tienen dispuestas en su interior en forma alternada una placa de plomo que será el ánodo y una placa de acero inoxidable que será el cátodo. En estas celdas, se aplica una corriente eléctrica continua, de muy baja intensidad, la que entra por el ánodo, viaja a través de la solución electrolítica y sale finalmente por el cátodo, de tal modo, el cobre de la solución es atraído por la carga negativa del cátodo migrando hacia él, depositándose en la superficie de la placa de acero inoxidable en forma permanentemente. De este modo, se obtienen catodos de cobre con una pureza del 99,99%.

Finalmente, una vez transcurridos 7 días en el ciclo catódico, los cátodos son cosechados haciendo uso de una máquina despegadora, luego, estos son lavados enérgicamente con agua caliente para remover los restos de impureza que pudieran haber quedado adheridos.

3.3.8 Exportación

Los cátodos obtenidos en los procesos de electrorrefinación y de electroobtención son examinados cuidadosamente para asegurar la calidad, de este modo, aquellos cátodos seleccionados son apilados, pesados y enzunchados para su despacho a lugares de embarque mediante trenes o camiones para ser posteriormente enviados en barco a diferentes partes del mundo.

Con la descripción de los distintos procesos por los cuales debe pasar el cobre previo a ser comercializado, se logra identificar a grandes rasgos cual es la participación de la planta de ácido sulfúrico en el proceso productivo. Esta planta, es de suma importancia en el proceso de lixiviación, ya que el ácido sulfúrico es utilizado para disolver el cobre de los minerales oxidados, además es el principal componente de la solución electrolítica necesaria para llevar a cabo los procesos de electroobtención y electrorrefinación, los cuales permiten obtener cátodos de cobre con un 99,99% de pureza, agregando valor al producto final.

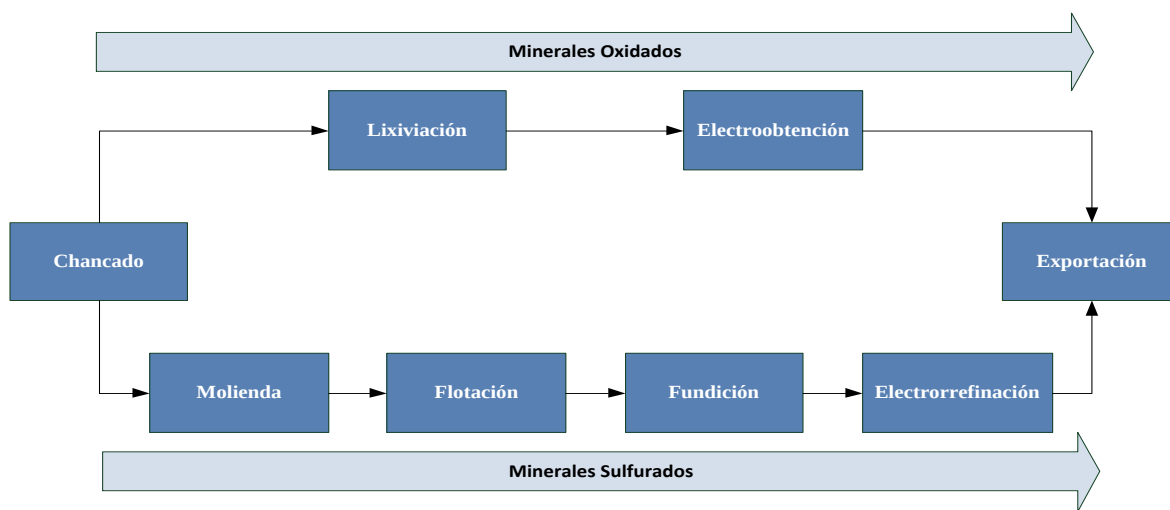


Figura N° 1: Diagrama de Flujo del Proceso Productivo

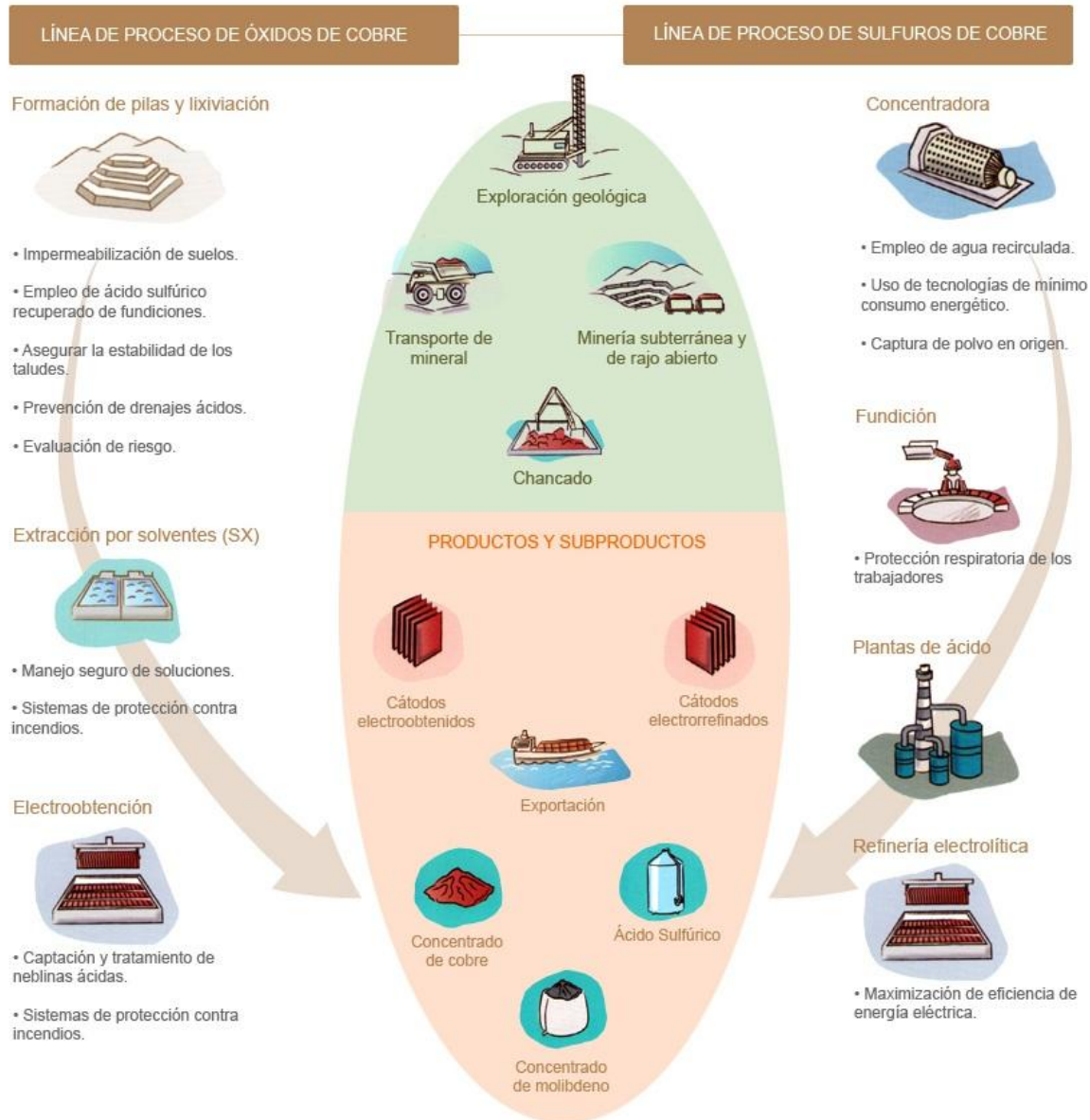


Figura N° 2: Proceso Productivo

3.4 Planta de Ácido Sulfúrico

La planta de ácido sulfúrico perteneciente a la fundición de Codelco Ventas, tiene como labor producir ácido sulfúrico y descargar gases sin azufre hacia la atmosfera, los cuales provienen del proceso de soplado, que ocurre en el Convertidor Teniente (CT) y los

tres Convertidores Pierce Smith (CPS) con que cuenta la división. Para lo anterior, en la planta se deben captar los gases con anhídrido sulfuroso, limpiarlos y retirar sus impurezas obteniendo como producto final ácido sulfúrico comercial y gas limpio sin azufre.

El diseño de la planta de ácido sulfúrico, se basa en las condiciones de proceso de los gases que genera la fundición, la cual considera la fusión de 423.000 [tms/año] de concentrado de cobre, con 27.0% de azufre y 27.5% de cobre. El aire de dilución en CT y CPS es de 120%, mientras que la captación de gases en campana es de un 90% y un 95% respectivamente, lo que genera una mezcla de gases promedio de 109.000 [Nm³/h] en base seca con 9.4% anhídrido de azufre en volumen que posteriormente es enviado a la planta de ácido sulfúrico para su tratamiento (Vásquez, 2016).

Flujo de Gas desde Fundición (Máximo)	125.000 [Nm³/h] (seco)	
Composición del Gas		
SO₂	10.0% - 12.0%	en vol.seco
O₂	11.0%	en vol.seco
CO + CO₂	2.0% - 3.0%	en vol.seco
H₂O	18.5%	en vol.máx
Polvo (máximo)	1.0	[gr/Nm³]
Polvo (normal)	0.5	[gr/Nm³]

Tabla N° 1 Composición de gases de fundición de cobre

Principales polvos contaminantes en los gases	[kg/h]
Cu	23.0
Zn	50.0
As	100.0
Hg	2.5

Tabla N° 2 Principales polvos contaminantes

Cuando se opera con las condiciones de gas de entrada establecidas anteriormente, la planta logrará una conversión total de SO_2 a SO_3 de aproximadamente un 99.2%.

Especificaciones del Ácido Producto	
Concentración de ácido sulfúrico	98.5% en peso
Temperatura	40°C máxima
Impurezas principales, As-Hg	< 1 [ppm]

Tabla N° 3 Especificación Ácido Producto

Tal como lo menciona Vásquez (2016), para que la planta de ácido sulfúrico cumpla su cometido, esta se divide en seis secciones las cuales se presentan a continuación.

3.4.1 Captación y manejo de gases

Esta sección consta de dos líneas de limpieza de gases, una para los gases de los convertidores Pierce Smith (CPS) y la otra para los gases del Convertidor Teniente (CT). Ambas líneas constan de un precipitador electrostático y ventiladores independientes para el movimiento de gases.

3.4.2 Lavado de gases

En esta sección se realiza el retiro de las impurezas contenidas en los gases, antes que estas produzcan daños a las instalaciones aguas debajo de la planta o contaminen ácido producto. Consta de una torre de humidificación, que enfría los gases y retira gran parte de impureza arrastradas por ellos, tres lavadores venturi-ciclones, los que mediante la turbulencia generada remueven el material particulado de mayor tamaño, dos torres empacadas operando en paralelo, en donde el contenido de agua de los gases se extrae por condensación y finalmente, los gases pasan a través de dos etapas de precipitadores

electrostáticos húmedos, donde es removida la neblina ácida con el resto de material particulado fino. El gas que sale de esta etapa es ópticamente transparente.

3.4.3 Secado de gases

El sistema de Secado de gases está diseñado para retirar la humedad remanente en el gas, antes que afecte el catalizador del reactor. Para cumplir su cometido se dispone de 2 torres con relleno cerámico conectadas en serie, en las cuales el flujo de gas fluye en contracorriente con un flujo de ácido sulfúrico, que absorbe vapor de agua desde los gases. A continuación de ambas torres de secado el gas pasa al soplador principal, el cual mueve los gases a través de la planta. La capacidad del soplador es regulada mediante una válvula ubicada en la zona de aspiración de gases. El soplador es una máquina que trabaja con una alimentación eléctrica de 6.000 Volt y 3.000 kilo Watt de potencia, que gira a una velocidad de motor de 1.490 rpm y la velocidad de compresión es de 3.770 rpm.

3.4.4 Conversión de anhídrido de azufre

El sistema de conversión está diseñado para que el 99,5% del anhídrido de azufre que transportan los gases sea convertido en óxido de azufre y consta de un reactor de catalítico de 4 etapas en serie y de sus respectivos intercambiadores de calor gas-gas, del tipo tubo y carcasa. Dentro del reactor, los catalizadores pentóxido de vanadio y de cesio, promueven la reacción de anhídrido de azufre con oxígeno para formar óxido de azufre. Esta reacción exotérmica calienta el gas, el cual al salir del reactor es enfriado calentando el gas que entra al reactor.

3.4.5 Absorción del óxido de azufre

El sistema de absorción está diseñado para absorber el 99% del óxido de azufre de los gases y para ello cuenta con dos torres de relleno cerámico, en las cuales los gases fluyen en contracorriente con ácido sulfúrico concentrado. El gas antes de salir de ambas torres de absorción, fluye a través de filtros velas eliminadores de neblina acida de alta eficiencia, que remueven las gotas de ácido arrastradas por el gas, como asimismo cualquier neblina muy fina. Así, el gas expulsado por la chimenea de las planta de ácido contiene menos de 1.200 ppm de anhídrido de azufre y esencialmente nada de óxido de azufre o neblina ácida.

3.4.6 Enfriamiento de agua

El sistema de enfriamiento de agua está diseñado para suministrar agua de refrigeración para las diferentes etapas de la planta de ácido y consta de dos torres de refrigeración de tiro inducido. El agua se enfría al pasar en contracorriente con un flujo de aire inducido por ventiladores montados en la parte superior de cada torre.

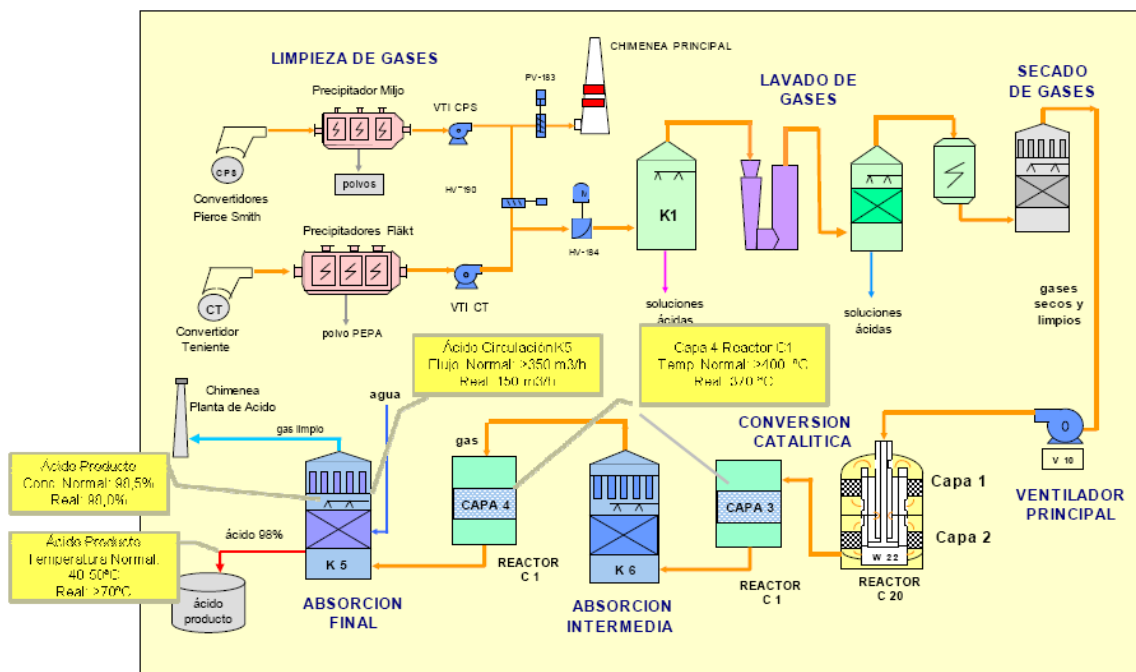


Figura N° 3: Esquema de Equipos de Planta de Ácido Sulfúrico

3.5 Mantenimiento

Mucho se ha hablado de mantenimiento, que este agrega valor a la empresa y que es visto como una ventaja competitiva. Sin embargo, no se ha dejado en claro cuál es la actividad específica que realiza. Por lo anterior, antes de profundizar más en la problemática, es preciso tener una noción clara de este proceso.

El mantenimiento es un proceso que tiene como misión lograr los niveles establecidos de disponibilidad para funciones de la instalación en un contexto operativo, valiéndose de talentos humanos, recursos, activos, controles y mecanismos de gestión satisfaciendo los niveles de producción o servicio comprometidos por la organización durante un determinado horizonte de tiempo con los estándares de seguridad vigentes y sin

incurrir en gastos que no contribuyan con el sostenimiento de las condiciones anteriores (Pistarelli, 2013).

3.5.1 Mantenimiento Correctivo

Consiste en la reparación de averías o fallos funcionales a medida que se van produciendo (Pistarelli, 2013). Además Prando, (1996) clasifica el mantenimiento correctivo en:

3.5.1.1 Mantenimiento Correctivo No Planificado

Es el mantenimiento de emergencia (reparación de roturas). Debe efectuarse con urgencia, ya sea por una avería imprevista a reparar lo más pronto posible o por una condición imperativa que hay que satisfacer (problemas de seguridad, de contaminación, de aplicación de normas legales, etc).

3.5.1.2 Mantenimiento Correctivo Planificado

Es aquel en donde se sabe con antelación que es lo que debe hacerse, de modo que cuando se detenga el equipo para efectuar la reparación, se disponga del personal, repuestos y documentos técnicos necesarios para realizarla correctamente.

3.5.2 Mantenimiento Preventivo

Actividad que pretende disminuir la frecuencia de las paradas no programadas aprovechando el momento más oportuno, tanto para producción como para mantenimiento. Permite, además preparar herramientas, repuestos e insumos y seleccionar al personal más capacitado (Arata, 2008).

3.5.3 Mantenimiento Predictivo

Corresponde a la sustitución de elementos tras síntomas. Es una técnica para pronosticar el punto futuro de falla de un componente de una máquina, de tal forma que dicho componente pueda reemplazarse, con base en un plan, justo antes que falle. Así, el tiempo muerto del equipo se minimiza y el tiempo de vida del componente se maximiza (Arata, 2008).

Ya definido el concepto de mantenimiento y conociendo la manera en que esta se clasifica, el lector podrá adentrarse a la teoría de la confiabilidad de tal modo comprender modelos probabilísticos que permitan cuantificar los conceptos descritos anteriormente.

3.6 Confiabilidad y Disponibilidad

En base al concepto de mantenimiento y su clasificación previamente presentados y reconociendo que el tiempo al cual un elemento falla puede ser modelado como una variable aleatoria ya que, “las fallas en una instalación industrial no necesariamente se presentan por causas claras y asignables a condiciones preestablecidas” (Arata, 2008) es posible establecer los siguientes modelos:

3.6.1 Confiabilidad

La confiabilidad se define como la probabilidad que un elemento funcione, sin fallar, durante un tiempo determinado bajo condiciones ambientales y de entorno preestablecidas. De la definición anterior, se desprende que un equipo, en cualquier instante de vida, puede estar sólo en dos estados; en funcionamiento o en falla, bajo condiciones externas o conocidas (Arata, 2008).

Fijadas las condiciones en las que se reconoce que el equipo o sistema está en falla bajo un entorno establecido, la confiabilidad de un elemento es función, solamente, del tiempo, cuyas características depende únicamente y exclusivamente de la distribución de probabilidades con la que la falla pueda modelarse en el tiempo. De este modo, la probabilidad acumulada de falla es:

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt$$

Mientras que la confiabilidad está dada por:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt = 1 - \int_0^t f(t)dt = 1 - F(t)$$

3.6.1.1 Tasa de Falla $\lambda(t)$

La tasa de falla también conocida como tasa de riesgo de falla se define como la probabilidad de tener una falla del sistema o del elemento entre los instantes t y $(t + dt)$ a condición que el sistema haya sobrevivido hasta el tiempo t y dependerá de la etapa del ciclo de vida en que se encuentre el elemento o sistema (Arata, 2008).

3.6.2 Disponibilidad

La disponibilidad corresponde a la aptitud de un sistema de estar en un estado para cumplir una función requerida, en condiciones dadas, en el instante requerido y por un intervalo de tiempo requerido, suponiendo que está asegurada la provisión de los medios externos necesarios; es decir función correcta del equipo en el momento en que se le requiera (Pistarelli, 2013).

La disponibilidad refleja la posibilidad de utilización de una instalación desde el punto de vista técnico, es decir excluyendo las detenciones no originadas por falla del sistema. La disponibilidad se define matemáticamente, como la razón que se establece entre el tiempo en que el sistema está, realmente, disponible para el funcionamiento y el tiempo total, que incluye al tiempo anterior mapas el de reparación (Arata, 2008).

De acuerdo a lo anterior, la disponibilidad A viene dada por la relación porcentual entre el tiempo de funcionamiento y el tiempo total. Lo que se expresa de la forma siguiente:

$$A = \frac{UT}{UT + DT}$$

“Donde UT (up time) presenta el tiempo en que el sistema ésta disponible para el funcionamiento y DT (down time) representa el tiempo fuera de servicio imputable a causas técnicas” (Arata, 2008).

Las funciones importantes entonces para la confiabilidad son $f(t)$, $F(t)$, $R(t)$ y $\lambda(t)$ pues conocida una de ellas es posible establecer las demás. Así, en base a lo mencionado en los temas anteriores respecto al mantenimiento, su distinta clasificación y modelos asociados, se podrá presentar el foco de la problemática en cuestión correspondiente a la parada de planta. Así, el lector podrá comprender todos los conceptos que este evento mayor involucra.

3.7 Parada de planta

Hasta aquí se ha establecido los conceptos necesarios para comprender la parada de planta el cual es un concepto mayor que engloba las temáticas previamente definidas. De

esta forma, se pretende mostrar en que consiste el evento en cuestión y las complicaciones asociadas a su realización.

Como lo menciona Pistarelli, (2013), una gran reparación es un conjunto de actividades complejas pero organizadas que conlleva la participación de muchas personas y el uso de gran cantidad de recursos materiales como máquinas, herramientas y tecnología en general. Se conoce también como Parada de Planta (Shutdown) porque detienen la marcha de los equipos más importantes del proceso productivo. Son eventos que, programados y planificados adecuadamente, brindan excelentes resultados para el negocio.

El objetivo de toda empresa que adopta como estrategia una Parada de Planta (PDP), es lograr la máxima disponibilidad de sus instalaciones en la etapa de uso y reducir al mínimo el tiempo y los recursos invertidos en la ejecución de la parada. Debemos analizar un evento como este, asumiendo que el departamento de mantenimiento ha determinado que no queda ninguna alternativa más que efectuar la detención total de los equipos para restaurar su deterioro acumulado. Vale la aclaración pues aún hoy son muchos los casos en que se aprovecha una parada de planta para hacer tareas que podrían hacerse, sin perjuicio alguno, durante periodos de operación. Tal situación no hace más que encarecer el evento, incrementar el riesgo de accidentes y elevar la tasa de fallas prematuras en aquellos equipos que han sido intervenidos inútilmente (Pistarelli, 2013).

Las actividades más frecuentes en una PDP son las restauraciones que incluyen la sustitución de partes. Se llaman revisiones totales o puestas a cero (overhaul) y son, por lo general, técnicas complejas. Con esta clase de intervenciones se reparan todos los

elementos sometidos a desgaste para asegurar la menor cantidad de fallas durante el tiempo de uso (Pistarelli, 2013).

Entendiendo el concepto de parada de planta y bajo la premisa que se desea generar una propuesta de mejora al mismo, es preciso hacer uso de herramientas que permitan controlar los recursos, activos, etc. y al mismo tiempo herramientas que permitan gestionar los procesos para su optimización. Es por ese motivo, que a continuación se presentan las herramientas necesarias para llevar a cabo este cometido.

3.8 Herramientas de Gestión

Las herramientas de gestión comprenden todas las aplicaciones, controles, metodologías que apoyan la gestión de una empresa. En particular se presentan herramientas que permiten entender procesos y optimizarlos en conjunto con herramientas de gestión y control de proyectos, de esta manera manejar distintos puntos de vista respecto al evento de parada de planta y aplicarlos según los requerimientos de las distintas actividades que deben ser ejecutadas.

3.8.1 Dirección de Proyectos

“La dirección de proyectos es la aplicación de conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas a las actividades del proyecto para cumplir con los requisitos del mismo” (PMI, 2013).

3.8.2 Work Breakdown Structure (WBS)

La estructura de división del trabajo (WBS) tal como lo define el PMI, (2013) es una técnica utilizada para dividir y subdividir el alcance del proyecto y los entregables del

proyecto en partes más pequeñas y manejables. El paquete de trabajo es el trabajo definido en el nivel más bajo de la WBS para el cual se puede estimar y gestionar el costo y la duración. El nivel de descomposición es a menudo guiado por el grado de control necesario para dirigir el proyecto de manera efectiva. El nivel de detalle para los paquetes de trabajo varía en función del tamaño y la complejidad del proyecto.

3.8.3 Earned Value Management (EVM)

La gestión del valor ganado (EVM) es una metodología que combina medidas de alcance, cronograma y recursos para evaluar el desempeño y el avance del proyecto. Es un método muy utilizado para la medida del desempeño de los proyectos. Integra la línea base del alcance con la línea base de costos, junto con la línea base del cronograma, para generar la línea base para la medición del desempeño, que facilita la evaluación y la medida del desempeño y del avance del proyecto por parte del equipo del proyecto. Es una técnica de dirección de proyectos que requiere la constitución de una línea base integrada con respecto a la cual se pueda medir el desempeño a lo largo del proyecto. Los principios del EVM se pueden aplicar a todos los proyectos, en cualquier sector (PMI, 2013).

Una parada de planta no es un evento que pueda ser estandarizado y por lo mismo no existe una metodología y enfoque único el cual seguir, misma razón por lo que fueron presentadas herramientas de distinta índole que sirven para la gestión de proyectos y procesos en general las cuales en conjunto con la teoría de confiabilidad y disponibilidad buscan generar una propuesta de mejora a la parada de planta de ácido sulfúrico de la empresa.

4 METODOLOGÍA

En este apartado, se presentan los pasos mediante los cuales el presente trabajo de título fue desarrollado, teniendo en consideración, que este tiene como limitante, el ser un caso aplicado a la planta de ácido sulfúrico de la empresa Codelco Ventas, por lo que, el hecho de replicar las técnicas, herramientas y metodologías aquí presentadas en otra división o compañía, no traerá consigo necesariamente los mismos resultados. Teniendo claro estos antecedentes, se procede a dividir la metodología en 3 grandes etapas.

La primera etapa, consiste en la revisión bibliográfica de distintos autores, orientada a temáticas que permitan conocer y sustentar de forma teórica, los conceptos, procesos, técnicas y herramientas relacionadas con la problemática de investigación. Para esto, se recopila y organiza información referente al proceso productivo de cátodos de cobre, obteniendo como resultado, la descripción de las fases mediante las cuales el material mineralizado es transformado para ser comercializado. Así, la descripción anterior, permite identificar la participación de la planta bajo estudio y con ello, el rol protagónico que tiene el ácido sulfúrico en los procesos de lixiviación, electroobtención y electrorrefinación. De este modo, de forma natural, se precisa conocer más en detalle los procesos internos que ocurren en la planta de ácido, por lo que se procede a realizar la revisión bibliográfica de la planta, permitiendo describir sus procesos e identificar sus equipos, lo que genera los antecedentes suficientes para determinar la importancia de realizar la detención de la planta para su mantenimiento. Por otro lado, también se realiza la revisión bibliográfica orientada a conocer el porqué de estos eventos, el enfoque desde la perspectiva industrial y las

herramientas de apoyo para la dirección y gestión de paradas, así, finalmente tener una visión global de este gran evento.

La segunda etapa, consiste en recopilar y organizar información en base a los antecedentes presentado por Vásquez (2016), para describir la situación actual en que hoy en día, son clasificados los activos de la planta en distintas categorías, programas las actividades a ser ejecutadas en la parada y la forma en que se controla el avance del evento. Así, en base a la descripción realizada, se genera un análisis de las herramientas, técnicas y metodologías aplicadas, tal como la jerarquización de los activos de la planta por el método de Criticidad total por riesgo, el uso de la técnica PERT para la programación de actividades, la estimación por analogía de costos involucrados para la generación de presupuestos y la aplicación de la metodología Earned Value Management (EVM) para el control de las actividades de la parada. A raíz del análisis anteriormente descrito, se procede a generar una evaluación de la situación actual en la que es realizada la detención de la planta, sustentándola en el juicio crítico del autor del presente trabajo de título, así, los resultados del diagnóstico, permite identificar las oportunidades de mejora asociadas al proyecto, las cuales serán los cimientos para la siguiente etapa.

Finalmente, en la tercera etapa, se elabora la propuesta de mejora que busca complementar el trabajo realizado por Vásquez (2016) y con ello, agregar valor en forma progresiva a la dirección y gestión de este gran evento. Así, se procede a desarrollar un plan de acción permita dar una atención especial a los activos, priorizando aquellos de mayor criticidad dentro del sistema, adoptando una estrategia de mantenimiento en base a la jerarquización realizada, apoyando la toma de decisiones del personal a cargo de liderar la parada. Además, es desarrollado un plan de gestión de riesgo, que permita identificar,

analizar y dar respuesta a eventos que tienen un impacto negativo en el cumplimiento del programa y potenciar aquellos eventos cuya ocurrencia traerá beneficios a la parada.

A continuación se entrega las fases en forma secuencial, las cuales que componen las 3 grandes etapas presentadas anteriormente.

1. Revisión bibliográfica, orientada a comprender el proceso de producción de cátodos de cobre y el rol que juega el ácido sulfúrico dentro de este proceso.
2. Revisión bibliográfica, orientada a comprender los procesos internos que ocurren en la planta de ácido sulfúrico e importancia de que esta opere en óptimas condiciones.
3. Revisión bibliográfica, orientada a comprender el porqué de la detención de una planta para su mantención y las herramientas de apoyo para la dirección y gestión de la misma.
4. Recopilar y organizar información sobre la situación actual mediante la cual es ejecutada la parada de planta basándose en el documento de Vásquez (2016).
5. Análisis de técnicas, herramientas y metodologías utilizadas hoy en día en la parada.
6. Diagnóstico de la situación actual en que se da la detención de la planta, permitiendo detectar necesidades a cubrir.
7. Propuesta de un plan de acción para la mantención de los activos de la planta de ácido y un plan de gestión de riesgos para el proyecto de parada

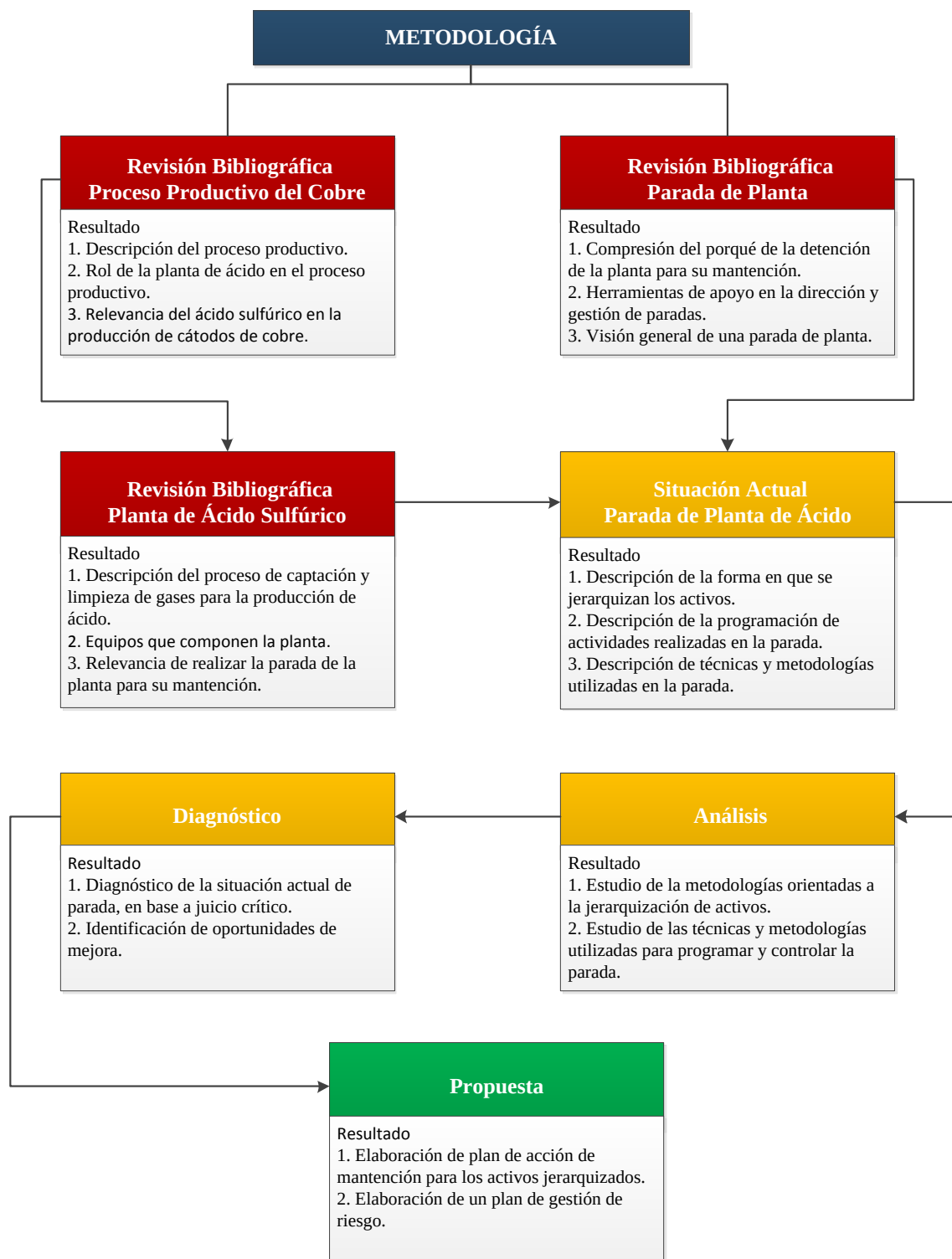


Figura N° 4: Metodología de Trabajo

5 PARADA DE PLANTA CODELCO VENTANAS

Conociendo el gran protagonismo que posee la planta de ácido sulfúrico en la captación y limpieza de gases contaminantes, así, como también su participación en el proceso productivo de cátodos de cobre, es lógico pensar en la importancia que representa para Codelco Ventanas operar con esta planta en óptimas condiciones. Por esta razón, se programa una parada de planta cada 12 meses, la cual brinda la oportunidad única para intervenir equipos que no están disponibles durante el año operacional y recuperar la funcionalidad superior de los mismos. Este gran evento, tiene un tiempo de duración de entre 30 a 40 días, se trabaja las 24 horas del día, los 7 días de la semana y sus costos son cercanos al 70% del presupuesto anual de la planta.

En la actualidad, las áreas de operación, mantenimiento y proyectos son las encargadas de planificar, programar, ejecutar y controlar la parada. Así, en este gran proyecto, se trabaja con dotación propia de Codelco, quienes lideran la ejecución de los trabajos y personal de empresas contratistas encargadas de realizar actividades diversas como lo son servicios de equipos (grúas móviles, torres y andamios), ejecución de trabajos de reparación y actividades de inspección con personal altamente calificado.

Dada la gran cantidad de recursos humanos y materiales utilizados en la parada de una planta, además de los costos asociados a la no producción, Codelco se encuentra continuamente mejorando los procesos de dirección, gestión y ejecución de este gran evento. Para esto, la empresa se basa en las propuestas realizadas por las distintas jefaturas participantes en la parada, quienes producto de su experiencia son capaces de identificar

oportunidades de mejora y adoptarlas en la parada de planta del año siguiente, con el fin de optimizar los recursos de las actividades que se desarrollan durante el tiempo que la planta permanece fuera de servicio. De este modo, el presente trabajo de título, utilizará como base el trabajo realizado y propuesto por Vásquez (2016), de tal modo, se busca complementar e identificar potenciales mejoras a ejecutar de acuerdo a este proyecto y presentar al directorio una óptima estrategia de ejecución de los trabajos a realizar.

5.1 Equipos en Planta de ácido Sulfúrico

En este apartado, son presentados los equipos responsables de la correcta operación de la planta de ácido sulfúrico y que habitualmente son mantenidos durante la parada de planta. Para ello, los equipos son agrupados según la función que cumplen en el proceso de captación y limpieza de los gases provenientes de fundición.

Grupo	Equipo
Captación y manejo de gases	Flakt 1
	Flakt 2
	Precipitador Miljo
Lavado de gases	Torre lavado K1
	Bomba P1/1
	Bomba P1/2
	Estanque B7
	Filtro F4
	Torre enfriamiento K2
	Válvula de agua W1/1 W1/2 W1/3
	Válvula descarga
	Válvula de ácido W1/1 W1/2 W1/3
	Medidor de flujo ácido K20
	Intercambiador de placas W1/1 W1/2 W1/3
	Estanque B27
	Torre enfriamiento K20
	Precipitadores húmedos Goslar
	Precipitadores húmedos Gea Bishop

Grupo	Equipo
Secado y absorción de gases	Torre Desmercurización K3
	Torre pos-secado K4
	Torre absorción K5
	Estanque B6
	Torre Absorción intermedia K6
	Pisos y bases de bombas
Conversión de SO ₂	Intercambiador de calor Gas-Gas W6 W10 W23 W24 W26 W27
	Precalentador
	Torre catálisis C-1
	Torre catálisis C-20
	Soplador V10
Enfriamiento	Torre W11
	Torre W25
	Filtro de Velas

Tabla N° 4: Equipos que componen planta de ácido sulfúrico Codelco Ventanas

5.1.1 Jerarquización de activos

Debido a la gran cantidad de equipos con que cuenta la planta de ácido sulfúrico, es preciso conocer cuáles de estos son los más críticos dentro del proceso y con ello, dar claridad hacia donde se deben enfocar los recursos de Codelco Ventanas en la parada de la planta. Por esta razón, la empresa está en vías de adoptar las medidas propuestas por Vásquez (2016), quien jerarquizó los activos de la planta de ácido sulfúrico haciendo uso el modelo de Criticidad total por riesgo propuesto por Parra y Crespo, (2012), método el cual es desarrollado por varias compañías y consultoras por su sencillez y fácil aplicación.

Para lograr obtener los resultados con este modelo, Vásquez (2016) conformó un equipo de trabajo con personal de operaciones, mantenimiento, planificación, seguridad y medio ambiente, los cuales entregaron información técnica de los equipos, utilización de recursos y estimación de los trabajos de acuerdo a su experiencia. De este modo, con la

información entregada, logró calcular el riesgo de cada equipo, el cual se obtiene como el producto entre la frecuencia de un fallo por la consecuencia que implica el mismo, para posteriormente ubicar dicho valor en la siguiente matriz de criticidad, permitiendo jerarquizar los activos en tres áreas: No Críticos (NC), Semi-Críticos (SC) y Críticos (C).

FRECUENCIA	4	SC	SC	C	C	C
	3	SC	SC	SC	C	C
	2	NC	NC	SC	C	C
	1	NC	NC	NC	SC	C
		10	20	30	40	50
		CONSECUENCIA				

Tabla N° 5: Matriz de Criticidad

De esta manera, en la tabla n°3 se presentan los equipos de la planta de ácido sulfúrico ordenados por su respectivo nivel de riesgo.

N°	Equipo	Frecuencia	Consecuencia	Riesgo
1	Soplador V10	4	50	200
2	Filtro de Velas	4	22	88
3	Torre absorción K5	1	50	50
4	Precipitador Miljo	3	30	90
5	Torre pos-secado K4	3	30	90
6	IdC Gas-Gas W6 W10 W23 W24 W26 W27	3	20	60
7	Torre lavado K1	2	28	56
8	Filtro F4	3	18	54
9	Intercambiador de placas W1/1 W1/2 W1/3	2	24	48
10	Estanque B6	2	20	40
11	Pisos y bases de bombas	4	9	36
12	Bomba P1/1	4	9	36
13	Bomba P1/2	4	9	36
14	Torre enfriamiento K2	1	30	30
15	Torre Absorción intermedia K6	1	30	30
16	Válvula de agua W1/1 W1/2 W1/3	3	9	27

N°	Equipo	Frecuencia	Consecuencia	Riesgo
17	Válvula de ácido W1/1 W1/2 W1/3	3	9	27
18	Torre catálisis C-1	1	30	30
19	Torre catálisis C-20	1	30	30
20	Flakt 1	1	26	26
21	Flakt 2	1	26	26
22	Precipitadores húmedos Goslar	1	26	26
23	Precipitadores húmedos Gea Bishop	1	26	26
24	Torre Desmercurización K3	1	26	26
25	Torre W11	1	24	24
26	Torre W25	1	24	24
27	Válvula descarga	2	9	18
28	Medidor de flujo ácido K20	2	9	18
29	Precalentador	1	15	15
30	Torre enfriamiento K20	1	14	14
31	Estanque B27	1	12	12
32	Estanque B7	1	10	10

Tabla N° 6: Jerarquización de activos modelo criticidad por riesgo

FRECUENCIA	4	3		1		1
	3	2	1	1	2	
	2	2	1	3		
	1	1	3	6	4	1
		10	20	30	40	50
		CONSECUENCIA				

Tabla N° 7: Matriz de criticidad de Equipos

Finalmente, en base a aquellos equipos de la planta que han afectado la disponibilidad de la misma en los últimos 3 años, se obtuvieron 5 equipos Críticos, 14 Semi-Críticos y 13 No Críticos.

5.2 Actividades realizadas en la parada de Planta de Codelco Ventanas

La lista de actividades que a continuación se presenta, contempla las tareas que realizan las áreas de operación y mantención, en donde el trabajo específico es desarrollado por las especialidades de mantenimiento mecánica, eléctrica e instrumentación y control.

Área	Actividad	Descripción de la actividad
1 MANTENCIÓN Y OPERACIONES	A	Elaboración de programa general de mantención
	B	Cálculo de costos y presupuesto
	C	Aprobación del programa
	D	Adjudicación de contratos Mantenimiento
	E	Detención de equipos (Enfriamiento)
	F	Limpieza interior y exterior de áreas y equipos
	G	Pruebas generales equipos planta de ácido
	H	Puesta en servicio general de la planta
	I	Revisión de equipos en terreno a plena carga
2 MECÁNICA	J	Elaboración de programa mantención mecánica
	K	Cálculo de costos y presupuesto
	L	Aprobación del programa
	M	Adjudicación de contratos área mecánica
	N	Entrega y bloqueo mecánico de equipos
	O	Apertura de equipos
	P	Evaluación de componentes
	Q	Mantenimiento general
	R	Verificar funcionamiento local
	S	Entrega del equipo operaciones
3 ELÉCTRICA	T	Elaboración de programa eléctrico
	U	Cálculo de costos y presupuesto
	V	Aprobación del programa
	W	Adjudicación de contratos Eléctricos
	X	Entrega y bloqueo eléctrico de equipos
	Y	Evaluación de componentes
	Z	Mantenimiento general
	AA	Verificar funcionamiento local
	AB	Entrega del equipo operaciones

4 INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL	AC	Elaboración de programa Instrumentación y Control
	AD	Cálculo de costos y presupuesto
	AE	Aprobación del programa
	AF	Adjudicación de contratos Instrumentación y Control
	AG	Retiro de instrumentos de control
	AH	Evaluación de componentes
	AI	Mantenimiento general
	AJ	Verificar funcionamiento local
	AK	Entrega del equipo operaciones

Tabla N° 8: Lista de actividades Parada de Planta Codelco Ventanas

5.2.1 Actividades predecesoras y tiempos de ejecución

Con la finalidad de desarrollar el método PERT y con ello obtener la ruta crítica asociada a las actividades presentadas anteriormente, Vásquez (2016) realiza un estudio de las tareas precedentes para cada actividad y con ello, el tiempo de duración las mismas basándose en un escenario optimista, pesimista y probable. Lo anterior, se muestra a modo de resumen en la tabla n° 9.

Área	Actividad	Predecesor	T [día]	Desviación
1 MANTENCIÓN Y OPERACIONES	A	0	2.17	0.50
	B	A	2.17	0.50
	C	B	1.00	0.33
	D	C	3.00	0.33
	E	D	1.42	0.25
	F	E	6.17	0.50
	G	S, AB, AK	2.17	0.50
	H	G	1.33	0.33
	I	H	1.17	0.17

Área	Actividad	Predecesor	T [día]	Desviación
2 MECÁNICA	J	0	2.17	0.50
	K	J	2.17	0.50
	L	K	1.00	0.33
	M	L	3.00	0.33
	N	M	2.17	0.50
	O	N	2.08	0.25
	P	F, O	7.83	0.50
	Q	P	6.17	0.50
	R	Q	2.17	0.50
	S	R	0.47	0.33
3 ELÉCTRICA	T	0	2.17	0.50
	U	T	2.17	0.50
	V	U	1.00	0.33
	W	V	3.00	0.33
	X	W	2.17	0.50
	Y	F, X	6.75	0.42
	Z	Y	6.17	0.50
	AA	Z	2.17	0.17
	AB	AA	0.47	0.13
4 INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL	AC	0	2.17	0.50
	AD	AC	2.17	0.50
	AE	AD	1.00	0.33
	AF	AE	3.00	0.33
	AG	N.X	5.17	0.50
	AH	AG	5.33	0.67
	AI	AH	6.33	0.67
	AJ	AI	2.33	0.33
	AK	AJ	0.48	0.15

Tabla N° 9: Actividades predecesoras y tiempos de ejecución

5.2.2 Diagrama PERT y Ruta Crítica

Una vez descritas las distintas actividades realizadas en la parada de planta, las tareas que preceden a cada una de estas y los tiempos de ejecución, Vásquez (2016) procede a desarrollar el diagrama PERT para posteriormente determinar la ruta crítica del proyecto.

De este modo, a partir del diagrama mostrado en la figura n° 5, se extraen las distintas rutas mediante las cuales se puede alcanzar la actividad final como también, el tiempo de duración de dichas rutas con su respectiva desviación estándar.

Ruta de Actividades	T [día]	Desviación
A-B-C-D-E-F-Q-R-G-H-I	29	4.42
J-K-L-M-N-O-P-Q-R-G-H-I	33	4.92
T-U-V-W-X-Y-Z-AA-AB-G-H-I	32	4.63
AC-AD-AE-AG-AH-AI-AJ-AK-G-H-I	32	4.83

Tabla N° 10: Ruta de Actividades

Finalmente, de la tabla n° 10 se concluye que la ruta crítica viene dada por la secuencia J-K-L-M-N-O-P-Q-R-G-H-I, ya que la desviación estándar de esta ruta tiene un valor mayor que las otras. Lo anterior, se traduce en que la parada de planta se ejecutará en un intervalo de tiempo de entre 28 a 38 días.

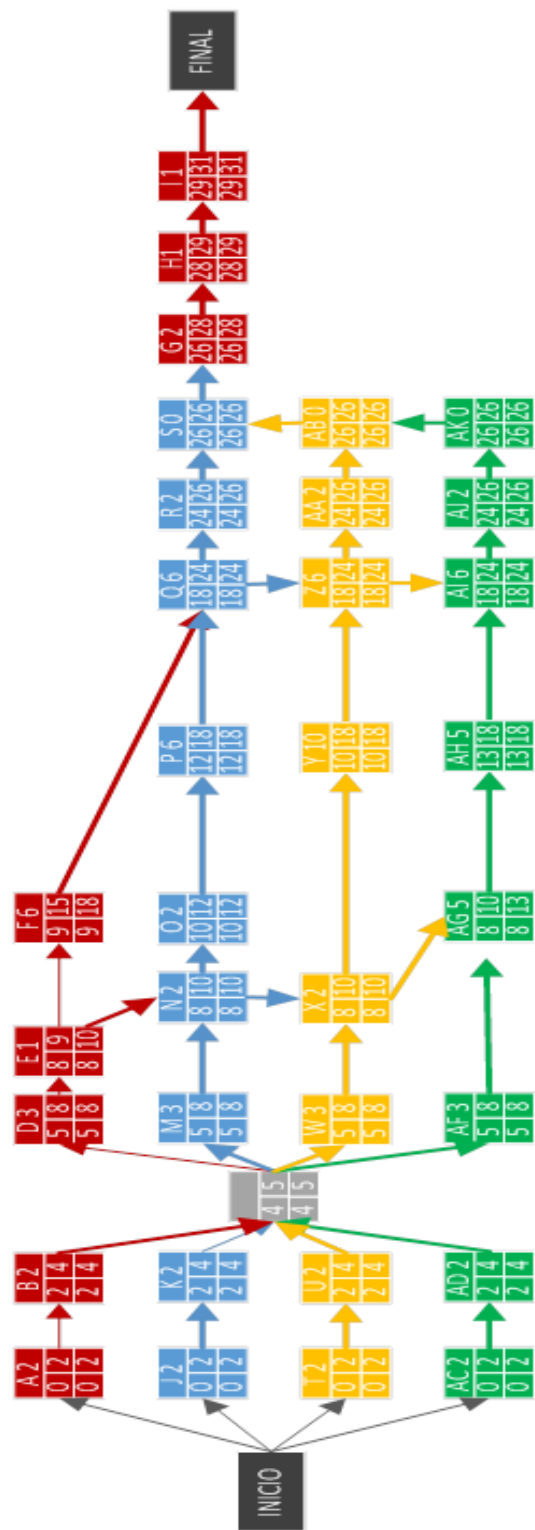


Figura N° 5: Diagrama PERT

5.3 Control de las actividades de la Parada de Planta mediante EVM

Obtenida la ruta crítica del proyecto y con ello, conocidas las actividades sobre las cuales se debe mantener particular cuidado respecto a su ejecución para no producir retrasos en la parada, Vásquez (2016) propone realizar el control del avance del proyecto en base al costo de las actividades que componen los paquetes de trabajo mediante la metodología Earned Value Management (EVM), conocido también en la dirección de proyectos como la Gestión del Valor Ganado.

Para llevar a cabo este cometido, es preciso conocer el presupuesto autorizado con el cual debe contar la planta de ácido sulfúrico para completar las distintas actividades, el plan mediante el cual se distribuirá el presupuesto a lo largo del proyecto de parada de planta y establecer criterios de mediación adecuados para el avance de los trabajos realizados. De este modo, con el fin de poner en curso la metodología EVM, Vásquez (2016) estima los costos de las distintas actividades a realizar y con ello el presupuesto con el cual se debe contar para completar los paquetes de trabajo. Una vez realizada la estimación de costos, distribuye el presupuesto a lo largo del proyecto lo cual le permitirá establecer la línea base para controlar y monitorear el avance de los trabajos.

5.3.1 Estimación de costos

Para llevar a cabo la estimación de costos de las distintas actividades y con ello la estimación del presupuesto de los paquetes de trabajo, Vásquez (2016) desarrolla el método de estimación de costos por analógica, tomando como referencia el costo de servicios realizados en otras mantenciones. Del levantamiento realizado, obtiene las siguientes estimaciones.

N°	DESCRIPCIÓN DE LA PARTIDA	EMPRESA	CANTIDAD	UNIDAD	P.U.	COSTO	SUBTOTAL
1	ACTIVIDADES PRELIMINARES				USD	USD	USD
1.1	Capacitación e inducción a trabajadores nuevos	IST	1	Mes	4.615	4.615	
1.2	Arriendo radios UHF portatil	Motorola	60	Unidad	90	5.385	
1.3	Prevencionistas de riesgos adicionales	Link Humano	4	Personas	3.077	12.308	
1.4	Acreditación de personal	Link Humano	1	Mes	6.154	6.154	
1.5	Alimentación	Nutrimento	1	GI	69.231	69.231	
1.6	Transporte	Pullman	1	GI	46.154	46.154	
1.7	Instalaciones de faena	Link Humano	1	GI	15.385	15.385	
							159.231
2	MANTENCIÓN Y OPERACIONES						
2.1	Servicio de Andamios	Aconcagua	200	Cuerpos	502	100.378	
2.2	Servicio de Grúa Pluma	Ecomaq	4	Unidad	51.000	204.000	
2.3	Arriendo grúa torre	Etac	1	Unidad	90.000	90.000	
2.4	Servicio de limpieza	Egesa	1	GI	30.769	30.769	
2.5	Reparación Reductor Torre K5	Sew	1	Unidad	23.077	23.077	
2.6	Retiro e instalación de aislación y enchape	Fenix Ingenieria	3655	m2	31	112.450	
2.7	Servicio de retiro de material contaminado	Disal	1	GI	15.385	15.385	
2.8	Cambio de juntas de expansión	Ultrapoly	18	Unidad	3.810	68.576	
							644.635
3	MANTENCIÓN MECANICA						
3.1	Servicio de mantención PPEE SECOS	Fenix	1	GI	83.671	83.671	
3.2	Servicio de asesoria tecnica PPEE SECOS	TRK	1	GI	22.860	22.860	
3.3	Servicio de mantención Precipitadores Humedos	Fenix	1	GI	120.730	120.730	
3.4	Asesoria tecnica Precitadores humedos	Hugo petersen	1	GI	50.000	50.000	
3.5	Enfriadores de placa (5 intercambiadores)	Alfa Laval	1	GI	28.897	28.897	
3.6	Servicio medición de intercambiadores gas-gas	Ischile	1	GI	58.158	58.158	
3.7	Reparación estructural C20 e IdC gas-gas	Ms Templo	1	GI	41.478	41.478	
3.8	Mantención sistema de ductos Grupo 1 y dampers	Aconcagua	1	GI	41.674	41.674	
3.9	Mantención mecánica Grupo 2	Aconcagua	1	GI	53.792	53.792	
3.10	Mantención mecánica Grupo 3	Aconcagua	1	GI	76.490	76.490	
3.11	Mantención mecánica Grupo 5	Aconcagua	1	GI	25.129	25.129	
							602.879
4	MANTENCIÓN ELECTRICA						
4.1	Servicio de inspeccion de ventilador V10	Siemens	1	Unidad	33.851	33.851	
4.2	Motores Media Tensión	Ferroman	1	GI	20.245	20.245	
4.3	Cambio interruptor 110 kV	Ferroman	1	GI	11.246	11.246	
4.4	Mantención SSEE (sub estación eléctrica)	Bosch	1	GI	50.000	50.000	
4.5	Reposición Alumbrado	Jose Cisternas	1	GI	12.560	12.560	
4.6	Cambios trazado cable alimentación	Proyectos	1	GI	20.000	20.000	
							147.902
5	MANTENCIÓN INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL						
5.1	Mantención Instrumentación	Newtron	1	GI	15.296	15.296	
5.2	Mantención de sistema de control	Proyectos	1	GI	25.361	25.361	
							40.657
6	CONTINGENCIAS						74.771
						Total USD	1.670.074

Tabla N° 11: Estimación de Costos

5.3.2 Valor Planificado

Una vez estimado el costo de los distintos paquetes de trabajo, se obtiene el Valor Planificado (PV), el cual corresponde al presupuesto autorizado para completar una

actividad y que debe ser distribuido a lo largo del proyecto, con el fin de establecer el trabajo físico que debería llevarse hasta un momento determinado. Así, Vásquez (2016) procede a distribuir el PV, obteniendo la curva “S” del proyecto, la cual dará la referencia para determinar el avance del mismo. Esta curva, sigue la lógica que al inicio de las actividades hay una tendencia de costes acumulados crecientes, mientras que estos decrecen hacia el final del proyecto. De esta manera, la distribución del PV queda resumida en la tabla n° 12.

PRESUPUESTO (PV)		SEMANA						TOTAL
ITEM	ACTIVIDAD	0	1	2	3	4	5	
1	ACTIVIDADES PRELIMINARES	20.769	29.231	26.154	26.154	26.154	30.769	159.231
2	MANTENCIÓN Y OPERACIONES	-	144.312	121.235	121.235	128.927	128.927	644.635
3	MANTENCIÓN MECANICA	-	103.132	112.765	112.765	112.765	161.453	602.879
4	MANTENCIÓN ELECTRICA	-	22.810	22.810	22.810	22.810	56.661	147.902
5	MANTENCIÓN INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL	-	8.131	8.131	8.131	8.131	8.131	40.657
6	CONTINGENCIAS						74.771	74.771
TOTAL		20.769	307.617	291.097	291.098	298.791	460.718	1.670.074
ACUMULADO (Línea Base) (PV)		20.769	328.386	619.483	910.581	1.209.372	1.670.089	
% ACUMULADO		1%	20%	37%	55%	72%	100%	

Tabla N° 12: Valor Planificado

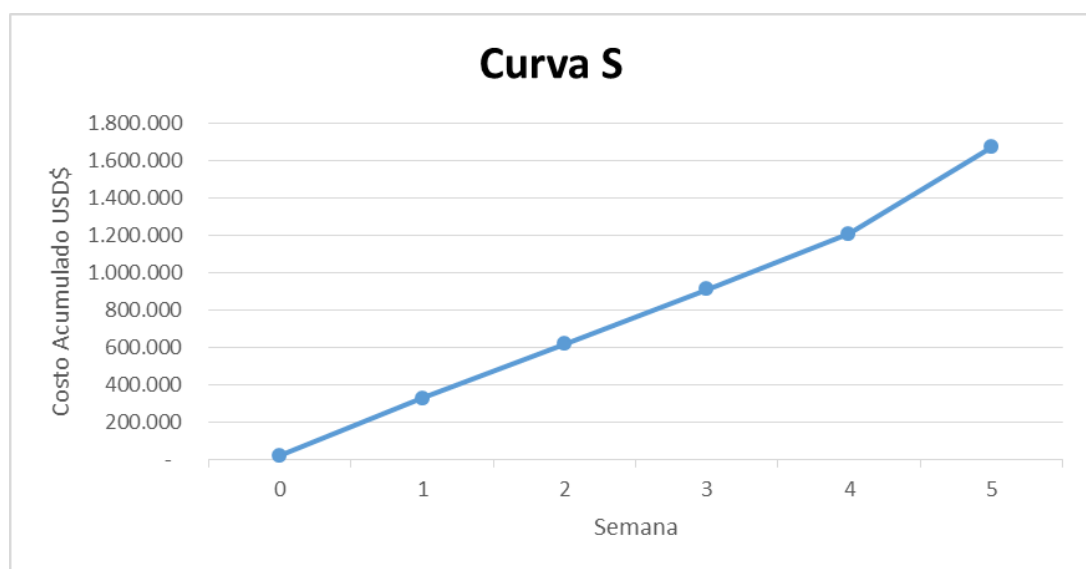


Figura N° 6: Curva S del Proyecto

5.3.3 Valor Ganado

Para determinar el Valor Ganado (EV) del proyecto, el cual corresponde a la medida del trabajo realizado en términos del presupuesto autorizado, es necesario contar con el porcentaje real de los trabajos realizados, el cual hoy en día se determina a partir de la información que entrega la persona ejecutante de la actividad en base a su experiencia, la cual es levanta semana a semana por personal del área de proyectos.

Una vez conocidos el porcentaje de las actividades planificadas, se procede a realizar el producto entre este porcentaje y el PV mencionado anteriormente, de esta manera es posible determinar el EV.

5.3.4 Costo real

El Costo Real (AC) del proyecto, corresponde al costo incurrido por el trabajo ya realizado y este se obtiene a partir de la información que entrega la empresa contratista a cargo de ejecutar la actividad, la cual previamente al desarrollo de la tarea informa el costo del servicio a realizar y los recursos materiales necesarios para alcanzar dicho objetivo.

Finalmente el área de proyectos compara el PV, EV y AC generando una serie de indicadores de desempeño y avance del proyecto los cuales permiten controlar las desviaciones presupuestarias y con ello tomar medidas con el fin de corregir dichas variaciones.

6 ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DE LA PARADA DE PLANTA

En el presente apartado, se desarrolla el análisis y diagnóstico del escenario actual en el que es ejecutada la detención de la planta de ácido de Codelco Ventas para su mantenimiento. Para ello, serán considerados los antecedentes presentados en el apartado anterior, con la finalidad de identificar oportunidades de mejora que estén orientadas a complementar el trabajo realizado por Vásquez (2016), en cuanto a la dirección y gestión de este gran evento. Lo anterior, pretende establecer la base para generar una propuesta que permita agregar valor de forma progresiva a la estrategia de mantenimiento adoptada por Codelco, con el objetivo de posicionar a la empresa dentro de la llamada World Class, ya que, una parada de planta planificada y programada adecuadamente, brinda excelentes resultados para el negocio.

Para llevar a cabo el análisis del escenario actual de parada, se toma la decisión de dividir los antecedentes presentados en el apartado anterior en 2 grandes secciones, en donde la primera, corresponderá a los antecedentes relacionados con la jerarquización de los activos de la planta de ácido y la segunda, corresponderá a los antecedentes relacionados con la programación y control de actividades del proyecto de parada. Lo anterior permitirá llevar a cabo un análisis más exhaustivo de la información presentada.

Finalmente, el análisis de los antecedentes de cada sección, permitirá generar un diagnóstico de la situación actual de parada y con ello, diseñar cambios específicos orientados a la resolución de problemas en base a las necesidades detectadas, por consiguiente, establecer los cimientos necesarios para generar un plan de mejora. Vale

señalar, que el diagnóstico mencionado, se basará en el juicio crítico y los conocimientos del autor del presente trabajo de título en las temáticas aquí expuestas, las cuales a su vez poseen sustento teórico en la literatura citada en el desarrollo del presente documento.

6.1 Análisis de la Jerarquización de Activos

Como ya es sabido, la planta de ácido sulfúrico de Codelco Ventas, está compuesta por diversos equipos los cuales fueron presentados en la tabla n° 4 y que en su conjunto permiten captar y limpiar los gases provenientes de fundición, además de producir ácido sulfúrico el cual tiene un papel protagónico en las etapas de lixiviación, electroobtención y electrorrefinación en el proceso productivo de cátodos de cobre. Teniendo como preliminar estos antecedentes, es de suponer la gran relevancia que tiene para Codelco Ventanas el correcto funcionamiento de la planta y con ello, la importancia de asegurar la disponibilidad de la misma. Por esta razón, la empresa adopta como estrategia una parada de planta, la cual se realiza cada 12 meses brindando la oportunidad única de intervenir aquellos equipos que normalmente no están disponibles durante la operación normal con el fin de recuperar la funcionalidad superior de los mismos.

Dada la gran cantidad de recursos humanos, económicos y tecnológicos utilizados en la parada de la planta, es preciso identificar aquellos activos sobre los cuales se debe priorizar y focalizar los esfuerzos para facilitar la toma de decisiones sin perder de vista que todos los equipos son de suma importancia en la disponibilidad de la planta. Por esta razón, Vásquez, (2016), realiza la jerarquización de los activos de la planta de ácido sulfúrico utilizando la metodología de Criticidad total por riesgo, cuyos resultados fueron presentados en la tabla n° 6, la cual muestra los equipos ordenados en forma jerárquica

según el área de criticidad obtenida en base a la frecuencia de falla y la consecuencia que implica la misma. En resumen, distinguió 5 equipos Crítico (C), 14 Semi-Críticos (SC) y 13 No Críticos (NC) los cuales han afectado la disponibilidad de la planta estos últimos 3 años.

6.2 Diagnóstico de la Jerarquización de Activos

El método de Criticidad total por riesgo para la jerarquización de activos, es una metodología semi-cuantitativa que destaca por su sencillez y practicidad en la industria, motivo por el cual, ha sido implementada por consultoras y empresas internacionales, tal como hacen mención Parra y Crespo, (2012), misma razón por la que Vásquez (2016) decide implementarla en la planta de ácido de Codelco Ventanas, conformando un equipo de trabajo, a cargo de aportar información técnica de los activos, además de su experiencia en los distintos aspectos del análisis. De esa manera, la jerarquización de activos, busca apoyar la toma de decisiones y optimizar la administración de esfuerzos en la gestión del mantenimiento, por lo que la decisión de adoptar la implementación de este método, es totalmente acertada.

Al contar con la jerarquización de los equipos de la planta, el personal a cargo de planificar y programar actividades de mantenimiento, tendrá la posibilidad de realizar esta labor en base a la prioridad establecida y la vez, tomar decisiones en forma rápida y certera. Sin embargo, a pesar de la gran labor realizada por Vásquez, (2016), no se distingue una propuesta clara que explique qué acción diferencial se debe realizar sobre estos activos, de tal modo priorizar y focalizar esfuerzos en aquellos equipos con mayor criticidad, además, existe ausencia de medidas concretas que permitan al personal a cargo de liderar la parada,

dirigir y gestionar los recursos involucrados. En base a estos antecedentes, surge la necesidad de generar un plan de acción que permita dar trato especial a los equipos, priorizando aquellos de mayor criticidad dentro del sistema, adoptando la gestión de mantenimiento más conveniente en base a la jerarquización realizada. Lo anterior, traerá como beneficio el uso eficiente de recursos humanos, económicos y tecnológicos, stock adecuado de partes y piezas a ser reemplazadas y mejoras en los tiempos de ejecución de las labores.

El plan de acción propuesto, deberá basarse en la información técnica entregada por personal participante de la parada encargado de planificar, programar y ejecutar tareas de mantenimiento en los equipos de interés, como también, la base de datos con el registro de modos de falla de los equipos, así, elaborar actividades de intervención específicas. Por otra parte, se considera que el plan a desarrollar debiese ser implementado en el corto plazo para los activos críticos, de ese modo, en la próxima parada de planta contar con medidas concretas a ser adoptadas, mientras que el plan de acción para los activos semi-críticos, deberá ser desarrollado en un mediano plazo en conjunto con las mejoras a ser incorporadas al plan de acción de activos críticos.

En la figura n° 7 se muestra de manera resumida el análisis y posterior diagnóstico desarrollado con lo que respecta a la jerarquización de los activos de la planta. Además, en la figura n° 8, son señalados los beneficios, requerimientos y plazos de implementación de la propuesta realizada.

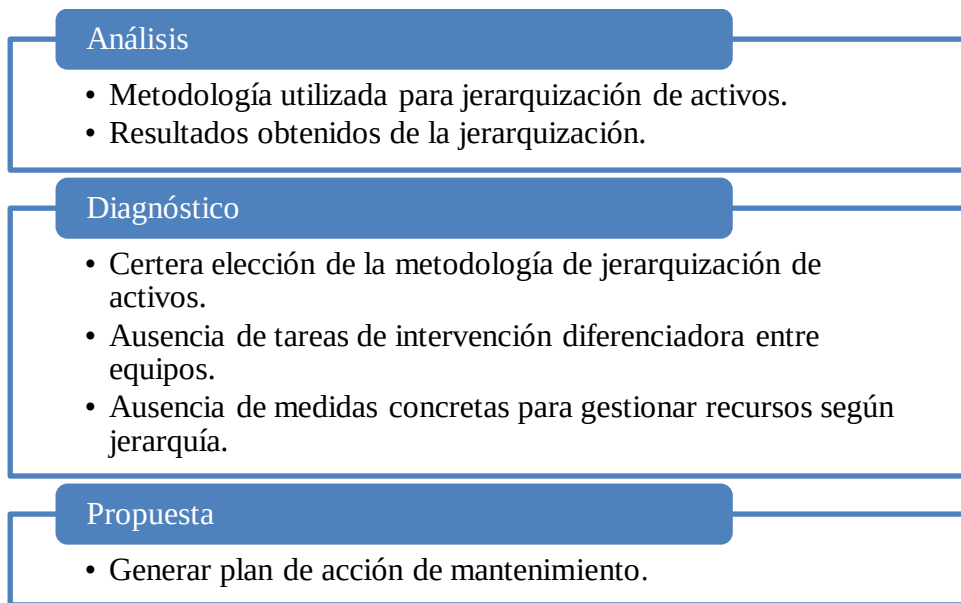


Figura N° 7: Análisis y diagnóstico jerarquización de activos

Beneficios Propuesta	Requerimientos	Plazos de Implementación
• Uso eficiente de recursos. • Stock de partes y piezas. • Mejora en tiempos de ejecución.	• Disponibilidad de un equipo de trabajo multidisciplinario. • Base de datos con modos de falla.	• Corto plazo para activos críticos. • Media plazo para activos simi críticos.

Figura N° 8: Beneficios, requerimientos y plazos para el plan de acción

6.3 Análisis del Programa y del Control de las Actividades

Considerando las diversas actividades a ejecutar en la parada de una planta, Vásquez, (2016), agrupa las tareas a realizar por las áreas de operación y mantención, según la especialización del trabajo requerido. Así, los grupos encargados de desarrollar las

tareas, quedan conformados por las especialidades de mantenimiento mecánica, eléctrica e instrumentación y control, cuya lista de actividades, quedan detalladas en la tabla n° 8 presentada en el apartado anterior.

Definidas la lista de actividades a ser ejecutadas por cada especialidad, se procede a estimar el tiempo de duración las tareas, asignando un tiempo optimista, pesimista y probable a cada actividad, además de establecer las tareas precedentes a cada una de ellas. Con estos antecedentes, se puede dar paso a la construcción del diagrama PERT el cual es presentado en la figura n° 4. A partir del diagrama anterior, se obtiene la ruta crítica del proyecto y en consecuencia, las actividades sobre las que se debe tener particular cuidado con el fin de no generar retrasos a la fecha mínima de término del proyecto.

Una vez que se cuenta con la red de actividades del proyecto, es preciso monitorear el avance de este, generando medidas correctivas que permitan cumplir con la planificación establecida. Por esta razón, el área de proyectos de Codelco Ventas, realiza el control del alcance, cronograma y recursos del proyecto, en base al presupuesto autorizado en las actividades que componen los diversos paquetes de trabajo a realizar. Para ello, hacen uso de la metodología Earned Value Management (EVM), conocido también en la dirección de proyectos como la Gestión del Valor Ganado.

Previo a la implementación de la metodología EVM, es necesario conocer los recursos financieros necesarios para completar cada paquete de trabajo, por lo que la primera labor realizada, es estimar los costos necesarios para completar las distintas actividades que componen a dichos paquetes. Para lograr este cometido, Vásquez (2016)

estimó los costos por analogía, tomando como referencia el costo de servicios realizados en mantenciones anteriores, cuyos resultados fueron presentados en la tabla n° 11.

Con el presupuesto para cada paquete de trabajo autorizado, es posible dar inicio a la implementación de la metodología EVM. Para esto, se distribuye a lo largo de la duración de la parada, el presupuesto obtenido para las distintas actividades que componen los paquetes de trabajo, en donde los resultados obtenidos fueron presentados en la tabla n° 12. Por consiguiente, es obtenido el Valor Planificado (PV) y con ello la curva “S” del proyecto, la cual permite dar la referencia para determinar el avance acumulado a una fecha dada.

Posteriormente, se procede a determinar el Valor Ganado (EV) y el Costo Actual (AC), los cuales serán contrastados con el PV para determinar el avance del proyecto. Sin embargo, para determinar el EV, es preciso conocer el porcentaje de avance real de las tareas, así, cuantificar el trabajo realizado en términos del presupuesto autorizado. Para esto, hoy en día el área de proyectos consulta semana a semana al personal a cargo de ejecutar los trabajos, cual es el porcentaje de avance realizado a la fecha y en base a estos antecedentes se procede a determinar el EV. Por otra parte, para determinar AC, previo al inicio de trabajos, se consulta a la empresa contratista el costo de los servicios y los materiales a utilizar la semana en la cual se está haciendo el control. Finalmente, se generan una serie de indicadores a partir de los valores acumulados de PV, EV y AC.

6.4 Diagnóstico del Programa y del Control de las Actividades

A pesar que el modelo PERT es una técnica para analizar, planificar y programar proyectos que data de los años 60, esta se encuentra totalmente vigente dentro de la

dirección de proyectos y destaca por el uso de la variable tiempo en forma estocástica, permitiendo asignar una función de distribución a las actividades de la parada y con ello una probabilidad de ocurrencia a la fecha de término del proyecto, permitiendo el manejo del riesgo asociado. Por lo mencionado anteriormente, la implementación de esta herramienta es correcta, ya que ofrece la posibilidad de simular los efectos de decisiones o situaciones imprevistas y aporta la oportunidad para estudiar sus consecuencias en relación a los plazos de cumplimiento del programa. Otro hecho que es interesante destacar, es que las actividades programadas en la malla PERT, están agrupadas según la especialidad del área encargada de ejecutar los trabajos, dejando en claro que las tareas son realizadas por distintos recursos y por lo tanto que no son ejecutables en forma paralela, situación que en muchas ocasiones no se considera.

En cuanto a la estimación de costos por analogía asociado a los paquetes de trabajos necesarios para terminar la parada de la planta, parece la medida más acertada, ya que como base se utiliza el costo de servicios externos incurridos con anterioridad en otras mantenciones, lo que hace pensar que estos serán bastante similares a los reales, considerando además, que dichos costos serán considerados como el presupuesto autorizado, el cual permitirá controlar el avance de la parada. De este modo, el seguimiento y monitoreo del alcance, cronograma y recursos de la parada, son realizados por medio de la implementación de la metodología Earned Value Management (EVM), la cual es recomendada para la gestión de costos por el PMI, (2013), aportando la posibilidad de tomar decisiones de forma preventiva una vez se detecte algún tipo de anomalía respecto a la planificación en la parada.

En base a los antecedentes presentados, orientados al apoyo en la dirección y gestión de la parada, se detecta la ausencia de medidas preventivas que permitan atender eventos no esperados y que al mismo tiempo, disminuyan la incertidumbre propia de todo proyecto. Para cubrir esta necesidad, se propone generar un plan de gestión de riesgos que permita aumentar la probabilidad y el impacto de los eventos positivos y disminuir la probabilidad y el impacto de los eventos negativos en el proyecto. Lo anterior, traerá como beneficios la mejora en el proceso de toma de decisiones y planificación de la parada, el aumento del nivel de control del proyecto lo que a su vez, impactará de manera positiva en la rentabilidad del mismo. Por otra parte, se espera un aumento de la probabilidad de éxito de este gran evento como también, la disminución del estrés en el ámbito laboral por presiones extras debido a circunstancias no contempladas.

Por otra parte, será necesario contar con un equipo multidisciplinario experimentado que aporten con lecciones aprendidas en paradas de planta anteriores y que enriquezca el proceso de identificación de riesgos en los distintos ámbitos que involucra el proyecto, como también el apoyo de todas las áreas participantes en la parada, de tal modo, generar acciones de manera preventivas frente a la ocurrencia de las posibles eventualidades. Dada la gran relevancia que tiene el contar con un adecuado plan de riesgos, es preciso que la empresa realice un primer acercamiento a estas temáticas en la próxima parada de planta, de tal modo, este mejore de manera progresiva y sustancial en el largo plazo.

En la figura n° 9 se muestra de manera resumida el análisis y posterior diagnóstico desarrollado con lo que respecta a la programación y control de actividades. Además, en la

figura n° 10, son señalados los beneficios, requerimientos y plazos de implementación de la propuesta realizada.

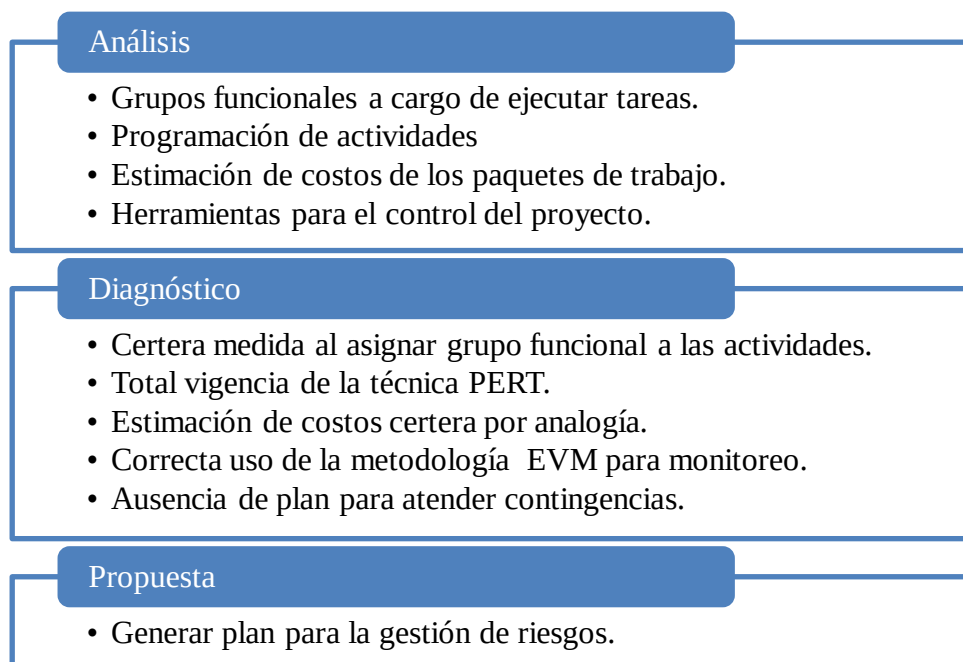


Figura N° 9: Análisis y diagnóstico del programa y control de actividades

Beneficios Propuesta	Requerimientos	Plazos de Implementación
• Mejora la toma de decisiones • Aumento del control en el proyecto • Aumento en la probabilidad de éxito. • Disminución de estrés.	• Disponibilidad de un equipo multidisciplinario experimentado. • Apoyo de todas las áreas participantes.	• Corto plazo para primer aproximación al riesgo. • Largo plazo para plan de riesgo robusto.

Figura N° 10: Beneficios, requerimientos y plazo para el plan de riesgo

7 DESARROLLO DE LAS PROPUESTAS

En el presente apartado, se discuten metodologías provenientes desde la literatura, orientadas a la elaboración de planes de mantenimiento y de gestión de riesgo. Con lo anterior, se pretende establecer las técnicas, métodos y modelos para el posterior desarrollo de las mejoras propuestas en el diagnóstico del apartado anterior, identificando aquellas que se adapten de mejor forma a la situación de la empresa Codelco Ventanas, así, desarrollar un plan de acción a medida, que permita dar trato especial a los activos de la planta de ácido sulfúrico según el grado de criticidad ya presentado, como también, la elaboración de un plan de gestión de riesgo que permita identificar, analizar, planificar respuestas y controlar los riesgos del proyecto de parada, aumentando la probabilidad y el impacto de los eventos positivos (oportunidades) y disminuyendo la probabilidad e impacto de los eventos negativos (amenazas).

7.1 Metodología del plan de acción de mantenimiento

Para la elaboración de un plan de acción que permita dar trato especial a los activos de la planta según su grado de criticidad, fueron estudiados diferentes trabajos de título orientados a la generación de planes de mantenimiento, de los cuales destaca el trabajo realizado por Vera, (2011), Sereno, (2013), y Figueroa, (2015), quienes a pesar de elaborar planes de mantenimiento para diferentes industrias convergen a la idea llevar a cabo un análisis de los puntos débiles de los equipos que conforman los sistema bajo estudio, para focalizar esfuerzos y recursos según la criticidad que posee cada activo. Por esta razón, el plan de acción de mantenimiento a desarrollar, basará su estrategia en el estudio de puntos

débiles de los equipos clasificados como críticos en la etapa de jerarquización, de este modo, en el próximo evento de parada, dirigir y gestionar recursos, esfuerzos y actividades asociados a aquellos activos, de manera más eficiente.

Para llevar a cabo el análisis de puntos débiles de los equipos más críticos de un sistema, existen diferentes metodologías de las cuales a continuación se presentan 3 de las más utilizadas y que a su vez son recomendadas por los autores de diferentes artículos. Lo anterior, permitirá identificar aquella metodología que se adapte mejor a las necesidades de Codelco Ventanas.

7.1.1 Análisis de Causa Raíz

El Análisis de Causa Raíz (ACR), también conocido en inglés como Root Cause Analysis (RCA), consiste en identificar de forma sistémica las causas primarias de las fallas ya ocurridas de fallos repetitivos y crónicos, para luego aplicar soluciones que las eliminen, idealmente, en forma definitiva. La aplicación de esta metodología es propuesta por Viveros, Kristjanpoller, Barbera, y Crespo, (2013), los cuales además añaden como paso previo, el realizar una inspección técnica-visual a los equipos críticos que permita conocer el estado actual de operación de los equipos, deficiencias en su funcionamiento, entorno de operación y toda información relevante para determinar las necesidades específicas de mantenimiento.

Para llevar a cabo esta metodología, se utiliza un árbol lógico de fallas el cual comienza con la definición del evento inicial, seguidamente se determinan los modos de falla, posteriormente se pasa al nivel de hipótesis y finalmente se llega al nivel de causas.

A continuación se presenta de manera más detallada los pasos para llevar a cabo el árbol lógico del análisis causa raíz.

Pasos	Descripción
Definir el evento o problema principal.	En este paso se realiza la descripción del mal actor o falla repetitiva que se encuentra ocasionando problemas y pérdida en la función de una pieza o proceso.
Identificar modos de falla.	Consiste en dar una descripción más detallada de cómo ocurrió el evento en el pasado basándose en hechos.
Generar hipótesis	Se generan suposiciones el cómo pudo suceder el modo de falla determinado en el paso anterior.
Buscar causa física.	Se busca la razón física del origen de la falla. En este nivel no se encontrara la causa de la falla si no un punto de partida para resolver el problema.
Buscar causa humana.	Se buscan aquellos errores cometidos por el factor humano que inciden directa o indirectamente en la ocurrencia de la falla.
Buscar causa latente	Se buscan todas aquellas deficiencias organizacionales y de gestión que derivan en errores humanos y convierten en crónicas las fallas en sistemas y procedimientos.

Tabla N° 13: Descripción árbol lógico de ACR

7.1.2 Análisis de Modos y Efectos de Falla

El Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF), conocida en inglés como Failure Mode and Effect Analysis (FMEA), tal como menciona Zampolli, (2012), es una metodología mediante la cual se estudian las formas potenciales en que un equipo podría descomponerse y los efectos de estos sobre el sistema, los cuales se clasifican de acuerdo a

su gravedad. Su aplicación, permite realizar análisis de confiabilidad y también sirve para identificar los procedimientos de mantenimiento a ser adoptados. En términos generales, la metodología AMEF es una acumulación de ACR ya que buscan todas las causas potenciales que podrían causar algún tipo de falla en el sistema, por lo que los pasos para su implementación son similares a los presentados en el punto anterior.

7.1.3 Análisis de Modos de Falla, Efectos y Criticidad

Análisis de Modos de Falla, Efectos y Criticidad (AMFEC), conocida también en inglés como Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA), tal como lo definen Aguilar, Torres y Magaña, (2010), es una metodología que incorpora criterios de riesgo a la identificación de los modos de falla para luego jerarquizarlos, de este modo, seleccionar la mejor tarea de mantenimiento a ser ejecutada. La FMECA no pretende cambiar la forma en la que se hace el mantenimiento, sino la forma en la que este se planea, pues, la metodología está enfocada en los modos de falla derivados de un análisis funcional y no enfocada en los equipos.

Metodología	ACR	AMEF	AMFEC
Objetivo	Eliminar causas que originan falla en los equipos	Estudiar formas potenciales en que un equipo podría descomponerse	Identificar los modos de falla del sistema y jerarquizarlos
Actúa sobre Causas	Ocurridas	Potenciales	Potenciales
Enfoque	Equipos	Equipos	Modos de falla
Permite	Mejorar las tareas de mantenimiento a ser adoptadas		

Tabla N° 14: Comparación entre metodologías para análisis de puntos débiles

En base a las metodologías descritas para el análisis de puntos débiles de los activos, se optará por desarrollar el análisis causa raíz (RCA) a los equipos críticos de la planta de ácido, pues este método, establece un buen punto de partida para el desarrollo de acciones de mantenimiento específico, con los cuales Codelco Ventanas hoy no cuenta y que permitirá orientar esfuerzos, recursos humanos y tecnológicos a los activos críticos en el próximo evento de parada. Por lo tanto, la metodología de análisis de modos y efectos de falla (AMEF) no será desarrollada en el presente trabajo, sin embargo, se debe considerar, que esta nos es más que el acumulativo de aplicar RCA a un mismo activo por diferentes causas de falla.

Por último, la metodología análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) también será descartada, ya que, a pesar que esta es sumamente completa al introducir el criterio de riesgo al análisis, jerarquiza los modos de falla y no los activos, situación que traería como consecuencia la pérdida el trabajo realizado por Vásquez (2016) en cuanto a la jerarquización de activos de la planta y por ende, la pérdida de la finalidad del presente documento, la cual es complementar el trabajo ya realizado. Lo anterior, es importante de resaltar, ya que el presente trabajo de título no pretende ser la solución definitiva a las complicaciones que trae consigo el evento de parada de planta, sino más bien, ser un aporte en la mejora progresiva del mismo.

7.2 Desarrollo del plan de acción de mantenimiento

Definida la metodología análisis de causa raíz (ACR) como medio para elaborar el plan de acción de mantenimiento, se procede a conformar un equipo de trabajo multidisciplinario compuesto por personal de las áreas de operación y mantención, las

cuales aportar su experiencia en las distintas temáticas a abordar. Al mismo tiempo, se dispondrá de una base datos obtenida desde SAP, la cual cuenta con los avisos de falla de los activos bajo análisis desde el año 2014 hasta el año 2016, brindando la objetividad que necesita el estudio a desarrollar.

En términos generales, el equipo de trabajo da inicio al ACR discutiendo cuál es el principal problema que ha surgido de manera reiterativo en el activo bajo análisis y la forma en que este se ha manifestado, de tal manera, generar un conjunto de hipótesis las cuales serán validadas o refutadas en base a los antecedentes registrados. Lo anterior, permite conducir el estudio hacia la causa raíz del evento no deseado y así, elaborar acciones correctivas las cuales formaran parte del plan de acción de mantenimiento y deberán ser ejecutadas en la próxima parada de planta.

7.2.1 Soplador V10

- **Evento:** el equipo de trabajo define como principal problema a ser analizado, la pérdida total de la funcionalidad del soplador V10, evento que ha ocurrido en 13 ocasiones entre los años 2014 y 2016.
- **Modos de falla:** en base a los registros de avisos de falla con los que se cuenta, se establece que la pérdida total de la funcionalidad del soplador V10 se debió a fallas en motor, cojinete, sensor de temperatura y sistema eléctrico, siendo esta última falla, la que ha ocurrido con mayor frecuencia, presentando 7 anotaciones en el registro. Por esta razón, los expertos estudiarán a fondo las causas de esta falla.

- **Hipótesis:** las suposiciones que realiza el equipo experto respecto a la falla del sistema eléctrico son el cortocircuito de alguna componente, el circuito abierto en alguna línea y la sobrecarga del sistema. Sin embargo, en base a los antecedentes con que se cuenta, son descartadas las primeras dos suposiciones ya que no existe registro alguno que permita validar estas hipótesis. Por consiguiente, se define a la sobrecarga del sistema como el principal causante de la falla eléctrica.
- **Causas físicas:** cuando ocurre una sobrecarga en el sistema eléctrico, los expertos la atribuyen directamente a un aumento en la intensidad de la corriente, situación que ocasiona la falla de los elementos de protección. Así, el mantenimiento correctivo que se realiza hoy en día, se basa en reemplazar los fusibles del sistema sin realizar un análisis del porqué ocurrió el aumento de amperaje.
- **Causas humanas:** en base a la opinión de los expertos, el aumento en la intensidad de la corriente se atribuye principalmente a una mala ejecución del equilibrio de la tensión entre las fases del motor como también, una mala ejecución en el aislamiento de las bobinas del mismo.
- **Causas latentes:** las causas humanas descritas en el punto anterior, se deben principalmente a que no existen procedimientos para llevar a cabo la mantención cuando ha ocurrido este tipo de falla y se actúa sobre las consecuencias de la misma, sin considerar la recomendaciones del fabricante del equipo.

- **Acción correctiva:** en la próxima parada de planta se recomienda llevar a cabo un correcto equilibrio entre las fases del motor del soplador V10 y a su vez reemplazar el material aislante de sus bobinas en base a las especificaciones que entrega el fabricante.

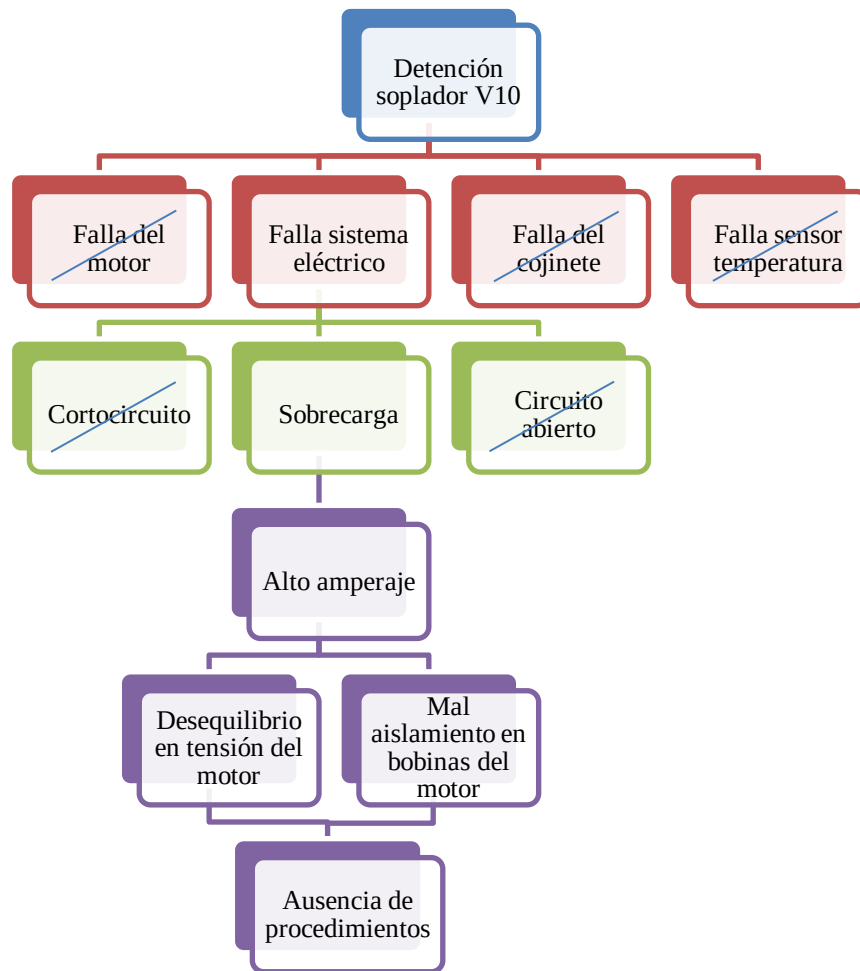


Figura N° 11: ACR soplador V10

7.2.2 Filtro de Velas

- **Evento:** el equipo multidisciplinario define como problema principal a ser analizado, la pérdida parcial de la funcionalidad del filtro de velas, evento que ha ocurrido en 13 ocasiones entre los años 2014 y 2016.

- **Modo de falla:** en base al registro de avisos de fallas con el que se cuenta, la pérdida parcial en la funcionalidad del filtro de velas se debió a fallas en el sistema de filtrado y en el sistema de magnético de captación de partículas metálicas, siendo esta última falla, la que ha ocurrido con mayor frecuencia, presentando 9 avisos de falla reportado por este hecho.
- **Hipótesis:** los expertos hacen suposiciones a cerca del cómo han ocurrido la falla del sistema magnético, barajando las posibilidad de un cortocircuito en el sistema, fallas en bobinas y sobrecarga. Sin embargo, en base a los antecedentes que se poseen, la hipótesis que registra una mayor frecuencia es la falla por sobrecarga presentado 7 anotaciones en la base de datos.
- **Causas físicas:** miembros del equipo de trabajo atribuyen la sobrecarga del sistema magnético a una alta intensidad de corriente circulante en el circuito, lo que se ha producido daños en la protección de seguridad. Así, el mantenimiento correctivo que se realiza hoy en día, se basa en reemplazar las protecciones dañadas sin realizar un análisis del porqué ocurrió el aumento de amperaje.
- **Causas humanas:** según los expertos, el hecho de que se produzca un alto amperaje se debe principalmente a una deficiente regulación en la intensidad de la corriente, lo que implicaría un aumento en la temperatura del circuito que culmina con la activación el sistema de protección.

- **Causas latentes:** las causas humanas descritas anteriormente, son ocasionadas por un inadecuado entrenamiento del personal lo que conlleva a un mal control de los parámetros de la intensidad de la corriente, actuando una vez más sobre los efectos que ocasiona dicho evento no deseado.
- **Acción correctiva:** en la próxima parada de planta se recomienda regular la intensidad de la corriente, en base a la información técnica que aporta el fabricante de los filtros de velas con sistema magnético y con ello, reemplazar componentes sensibles por fallas anteriores.

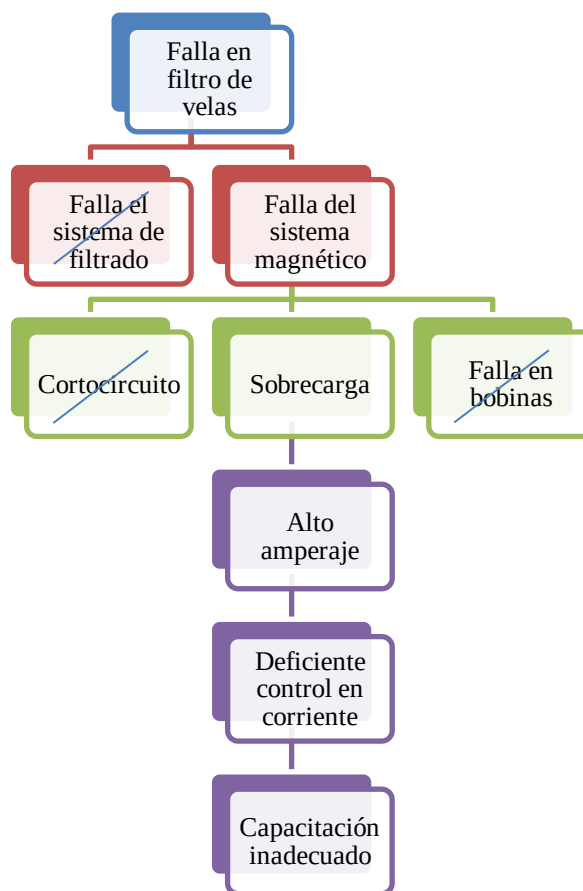


Figura N° 12: ACR filtro de velas

7.2.3 Torre de absorción K5

- **Evento:** el equipo de expertos define como principal problema a ser analizado, la falla parcial de la funcionalidad de la torre de absorción K5, pues esta situación se ha repetido en 11 ocasiones entre los años 2014 y 2016. Se debe considerar que este activo está compuesto por diverso equipos a los cuales es posible atribuir su falla.
- **Modo de falla:** en base al registro de avisos de fallas con el que se cuenta, la pérdida parcial en la funcionalidad de la torre de absorción K5 se ha debido a fallas en el sistema eléctrico, bombas, intercambiador de calor y piping, siendo esta última, la falla con mayor frecuencia al presentarse en 7 oportunidades en los registros.
- **Hipótesis:** los expertos hacen suposiciones a cerca del cómo han ocurrido la falla del piping, barajando las posibilidad de obstrucción, corrosión, abrasión y fatiga en tuberías y válvulas. Sin embargo, en base a los antecedentes que se poseen, la hipótesis que registra una mayor frecuencia es la fatiga del material ya que se presenta 5 avisos de falla que atribuyen el problema a esta causa.
- **Causas físicas:** miembros del equipo de trabajo atribuyen la fatiga del material a fenómenos de cavitación y golpes de ariete que son los principales causantes de averías en válvulas y tuberías. Lo anterior, se traduce en un mantenimiento correctivo basado en reemplazar las componentes dañadas, sin investigar las causas que provocan los fenómenos mencionados.

- **Causas humanas:** el hecho de que se produzca cavitación y/o el golpe de ariete, se debe principalmente a violentos cambios en la velocidad del fluido provocando una sobrepresión. Lo anterior se debe principalmente a cierres de válvulas realizados de manera abrupta y a válvulas reguladoras de flujo mal calibradas.
- **Causas latentes:** las causas humanas descritas anteriormente, son ocasionadas por un entrenamiento inadecuado del personal a cargo y con lo mismo, ausencia de procedimientos orientados a conocer el estado actual de los parámetros existentes en instalaciones de piping.
- **Acción correctiva:** en la próxima parada de planta se recomienda calibrar válvulas reguladoras de flujo y reemplazar válvulas sometidas constantemente a cierres abruptos, de este modo, prevenir la fatiga inesperada del material.

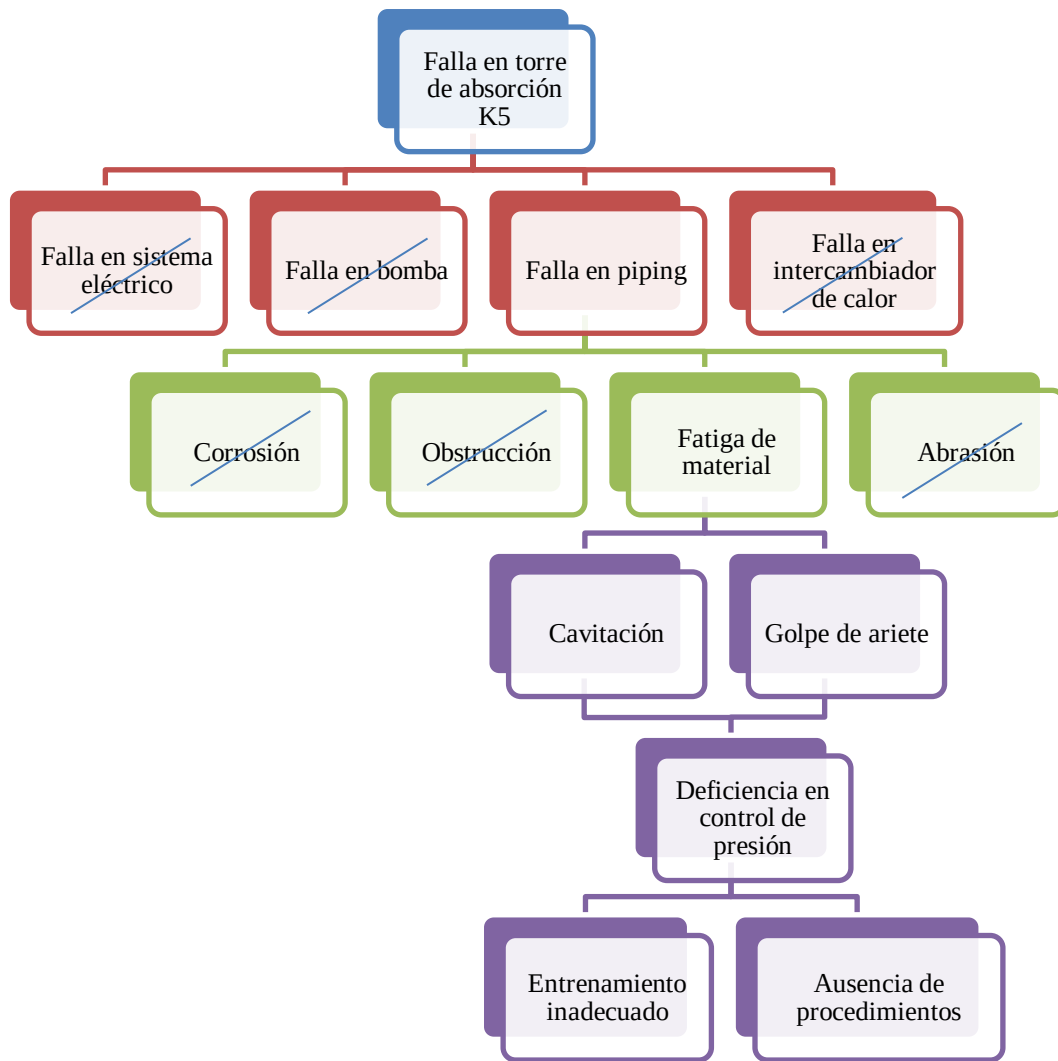


Figura N° 13: ACR torre de absorción K5

7.2.4 Precipitador Miljo

- **Evento:** el equipo de trabajo define como problema principal a analizar, la pérdida parcial de la funcionalidad del precipitador miljo, el cual presenta problemas de manera reiterativa en el pasado con 12 registros de falla entre los años 2014 y 2016.

- **Modo de falla:** los antecedentes con los que se cuenta, señalan que la pérdida parcial de la funcionalidad del precipitador miljo se ha debido a fallas en el sistema de descarga de partículas, falla en el sistema de placas colectoras y fallas en el sistema de golpeteo, siendo esta última la falla con mayor frecuencia al presentarse en 8 ocasiones.
- **Hipótesis:** el equipo de trabajo realiza suposiciones respecto a las causas que hay detrás de la falla reiterativa del sistema de golpeteo entro de las que se encuentra la fallas en las bobinas del sistema, la falla en el sistema de impulsos magnéticos y la desenergización del sistema. Sin embargo, basados en los antecedentes del registro de fallas, la hipótesis que presenta mayor frecuencia es la pérdida de energía del sistema, al ser registrada en 5 ocasiones.
- **Causas físicas:** los expertos atribuyes la falle en la energización del sistema debido a daños en la protección térmica de seguridad productor de una sobrecarga. Sin embargo al igual que en ocasiones anteriores, el mantenimiento correctivo se basa en reemplazar la protección térmica que en general son fusibles o interruptores sin preguntarse el porqué de la sobrecarga ocurrida.
- **Causas humanas:** el hecho de que ocurra una sobrecarga en el sistema, se debe principalmente a que existe baja o nula regulación de la intensidad de la corriente, cual se encarga de inducir un campo magnético sobre las bobinas del sistema.

- **Causas latentes:** las causas humanas descritas anteriormente, son ocasionadas por ausencia de procedimientos orientados a la regulación en la intensidad de la corriente actuando una vez más sobre los efectos de la falla.
- **Acción correctiva:** en la próxima parada de planta se recomienda regular la intensidad de la corriente en función de la frecuencia que se desea que el sistema de golpeteo actúe, reemplazar bobinas y sistemas de protección térmica sensibles dada las fallas anteriores.



Figura N° 14: ACR precipitador miljo

7.2.5 Torre post-secado K4

- **Evento:** el equipo multidisciplinario define como problema principal a ser analizado, la falla parcial de la funcionalidad de la torre post-secado K4, pues esta situación se ha repetido en 13 ocasiones entre los años 2014 y 2016. Al igual que para el caso de la torre de absorción K5, este activo está compuesto por diverso equipos a los cuales es posible atribuir su falla.
- **Modo de falla:** en base al registro de avisos de fallas con el que se cuenta, la pérdida parcial en la funcionalidad de la torre de post-secado K4 se debió a fallas en el sistema distribuidor de ácido, piping y bombas siendo esta última, la falla con mayor frecuencia al presentarse en 9 ocasiones.
- **Hipótesis:** el equipo de trabajo hace suposiciones a cerca del cómo han ocurrido la falla de las bombas barajando las posibilidad de eje cortado, falla en el rodamiento, falla del sello mecánico y falla en el machón de acoplamiento. Sin embargo, en base a los antecedentes que se poseen, la hipótesis que registra una mayor frecuencia es la falla en el machón de acoplamiento ya que se presenta 6 anotaciones.
- **Causas físicas:** miembros del equipo de trabajo atribuyen la falla del machón de acoplamiento a la sobrecarga en el flujo, fatiga de material y a la vibración excesiva, sin embargo, los expertos basados en su experiencia definen que la principal causa física se debe al exceso de vibración. Lo anterior, se traduce en un mantenimiento correctivo

basado en reemplazar el machón dañado, sin investigar las causas que generar el inconveniente en las diferentes bombas que cuenta la torre post-secado K4.

- **Causas humanas:** los expertos explican que el hecho de que se produzca vibración excesiva se debe principalmente a un mal balanceo del eje de la bomba y a un defectuoso alineamiento entre el eje de la misma y el motor que va acoplado. Sin embargo, en base a la experiencia en mantenimientos realizados en la torre K4, estos atribuyen la vibración excesiva por deficiente ejecución de alineamiento.
- **Causas latentes:** las causas humanas descritas anteriormente, son ocasionadas por malos procedimientos de mantenimiento y el uso de herramientas inadecuadas para el alineamiento entre el eje de la bomba y motor.
- **Acción correctiva:** en la próxima parada de planta se recomienda alinear los ejes de la bomba y motor haciendo uso de herramientas apropiadas tales como el alineador láser o el reloj comparador de carátula utilizados en estos casos y al mismo tiempo, reemplazar machones de acoplamiento sensibles, sometidos a vibraciones excesivas anteriores.

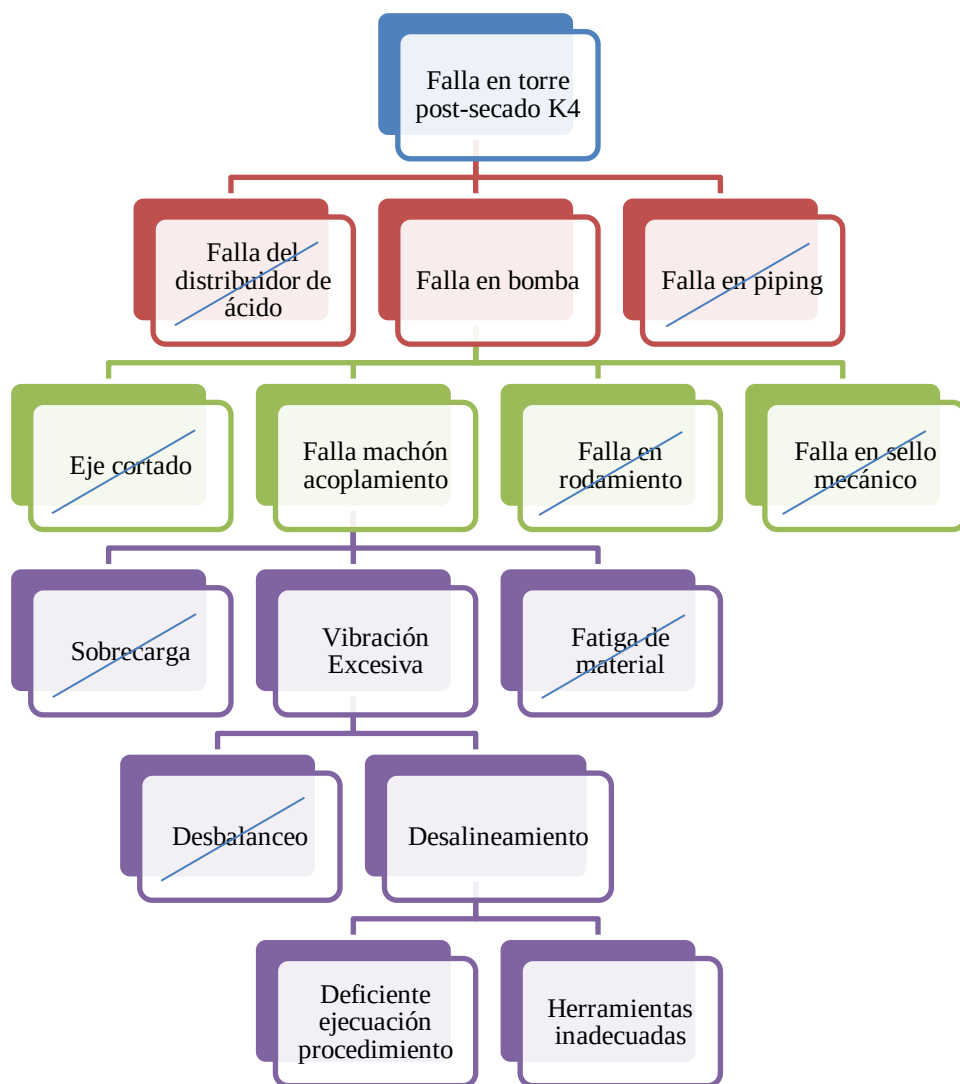


Figura N° 15: ACR torre post-secado K4

Finalmente, la implementación del ACR sobre los equipos críticos de la planta, permitió hallar los puntos débiles de los mismos y con ello, elaborar acciones correctivas específicas a ser ejecutadas en el próximo evento de parada, complementando las actividades de mantenimiento ya realizadas. Vale mencionar, que esta no es la solución definitiva a los problemas que conlleva el evento de parada pero sin duda pretende ser un aporte al mismo.

Activo	Modo de Falla	C. Físicas	C. Humanas	C. Latentes	Acciones
Soplador V10	Falla del sistema eléctrico	Alto amperaje	- Desequilibrio en tensión entre fases del motor. - Mal aislamiento bobinas del motor.	Ausencia de procedimientos.	- Equilibrar tensión entre fases del motor. - Reemplazo del material aislante entre bobinas.
Filtro de velas	Falla del sistema magnético	Alto amperaje	Deficiente regulación de la intensidad de corriente	Entrenamiento inadecuado.	- Regular la intensidad de la corriente. - Reemplazar componentes sensibles por fallas anteriores.
Torre de Absorción K5	Falla en piping	- Cavitación - Golpe de ariete	Deficiente control de presión	- Entrenamiento inadecuado - Ausencia de procedimientos.	- Calibrar válvulas reguladoras de flujo. - Reemplazar válvulas sometidas constantemente a cierres abruptos.
Precipitador Miljo	Falla en sistema de golpeteo	Alto amperaje	No existe regulación en la intensidad de corriente	Ausencia de procedimientos	- Regular intensidad de la corriente. - Reemplazo sistema de protección térmica. - Reemplazo de bobinas.
Torre post-secado K4	Falla en bomba	Excesiva vibración	Desalineamiento	- Ejecución de procedimientos deficiente. - Herramienta inadecuada.	- Alineación de ejes de forma correcta. - Reemplazo de machón de acoplamiento sensibles.

Tabla N° 15: Resultados ACR

7.3 Metodología del plan de gestión de riesgos

Para la elaboración de un plan de gestión de riesgos, que permita disminuir la incertidumbre presente en el proyecto, se aplicará la metodología que propone la Guía de los fundamentos de la dirección de proyectos, desarrollada por el Project Management Institute (PMI) en su quinta edición. Sin embargo, en esta metodología, serán consideradas ciertas simplificaciones, ya que la finalidad del presente trabajo de título es complementar el trabajo realizado por Vásquez (2016) y establecer un punto de partida en temáticas no consideradas hasta el momento, las cuales deberán ser mejoradas de manera progresiva.

Previo a la presentación de la metodología mencionada, es preciso definir qué es el riesgo de un proyecto, para ello, el PMI, (2013), lo define como un “evento o condición incierta que, de producirse, tiene un efecto positivo o negativo en uno o más de los objetivos del proyecto, tales como el alcance, el cronograma, el costo y la calidad”. Así, el objetivo del plan de gestión de riesgos, será aumentar la probabilidad y el impacto de los eventos positivos (oportunidades) y disminuir la probabilidad y el impacto de los eventos negativos en el proyecto (amenazas). Comprendiendo el objetivo que persigue el plan de gestión de riesgos, a continuación se presenta de manera detallada el trabajo a realizar en cada una de las cinco etapas necesarias para alcanzar el plan deseado.

7.3.1 Planificación de la gestión de los riesgos

La planificación de la gestión de los riesgos, es el proceso de definir cómo realizar las actividades de gestión de riesgos de un proyecto. El beneficio clave de este proceso es que se establecen las actitudes frente al riesgo, los umbrales y las tolerancias, que describen el nivel de riesgo que una organización soportará, como también los recursos económicos

asignables. Por lo tanto, este plan es vital para comunicar y obtener el acuerdo y el apoyo de todos los interesados a fin de asegurar que el proceso de gestión de riesgos sea respaldado y llevado a cabo de manera eficaz.

Para llevar a cabo este cometido, se realizará una reunión con participantes miembros del equipo del proyecto e interesados con la responsabilidad de gestionar la planificación y ejecución de actividades relacionadas con los riesgos. Con lo anterior, se pretende definir los planes de alto nivel para llevar a cabo las actividades de gestión de riesgos y con ello, determinar la probabilidad de ocurrencia de los eventos riesgosos y el impacto que traería la materialización de los mismos. Lo anterior, permitirá desarrollar una matriz de probabilidad e impacto, la cual posteriormente será utilizada en el proceso de análisis de los riesgos.

7.3.2 Identificar los riesgos

La identificación de riesgos del proyecto, es un proceso iterativo en donde son determinados y documentados los eventos que pueden afectar al proyecto en conjunto con sus características. El beneficio clave de este proceso, es la documentación de los riesgos existentes y la capacidad que confiere al equipo del proyecto para anticipar eventos. Así, para el desarrollo de este proceso, existen una serie de herramientas y técnicas dentro de las cuales destaca la tormenta de ideas (brainstorm), la técnica Delphi y las entrevistas con participantes del proyecto, entre otras. En particular, en el caso de estudio, será utilizada la herramienta tormenta de ideas por su sencillez y fácil implementación.

7.3.3 Análisis de riesgos

El análisis de los riesgos es el proceso mediante el cual se estudian las posibles oportunidades y amenazas que traen consigo los eventos riesgosos ya identificados. Para a cabo este cometido, el análisis se realizada en forma cualitativa y cuantitativa las cuales son presentadas a continuación.

7.3.3.1 Análisis cualitativo de riesgos

El análisis cualitativo del riesgo, es el proceso de priorizar los eventos riesgosos identificados, evaluando y combinando la probabilidad de ocurrencia e impacto de los mismos. El beneficio clave de este proceso, es que permite reducir el nivel de incertidumbre y concentrarse en los riesgos de alta prioridad estableciendo estrategias estándares.

Para llevar a cabo este cometido, se utiliza la matriz de riesgo elaborada en la etapa de planificación, la cual especifica las combinaciones de probabilidad e impacto asignado una calificación a cada evento riesgoso con su respectiva estrategia de respuesta, las cuales consisten en explotar, compartir, mejorar y aceptar en el caso que el evento sea una oportunidad y de evitar, transferir, mitigar y aceptar en caso que el evento sea una amenaza.

7.3.3.2 Análisis cuantitativo de riesgos

El análisis cuantitativo de riesgos es el proceso mediante el cual se expresa numéricamente la probabilidad de ocurrencia los riesgos identificados y el impacto de los mismos sobre los objetivos principales del proyecto. El beneficio clave de este proceso es que genera información cuantitativa sobre los riesgos para apoyar la toma de decisiones a

fin de reducir la incertidumbre del proyecto y con ellos, se determinan las reservas de contingencia necesarias a ser consideradas en el presupuesto final de la parada.

Para determinar las reservas de contingencia del proyecto, se utilizará el análisis del valor esperado (VE), el cual, permite determinar resultados cuando existen escenarios bajo incertidumbre. Para ello, se realiza el producto entre la probabilidad de ocurrencia de cada evento riesgoso y el impacto en términos monetarios, teniendo en consideración que las oportunidades se expresan con valores negativos, mientras que el de las amenazas se expresa con valores positivos. Finalmente, la suma total de los VE de cada riesgo determina las reservas de contingencia del proyecto.

7.3.4 Plan de respuesta a los riesgos

El plan de respuesta a los riesgos, es el proceso mediante el cual se desarrollan opciones y acciones para mejorar las oportunidades y reducir las amenazas en base a los objetivos del proyecto. El beneficio clave de este proceso, es que aborda los riesgos en función de su prioridad, introduciendo recursos y actividades en el presupuesto, el cronograma y el plan para la dirección del proyecto, según las necesidades.

Al igual que para los procesos anteriores, existen varias estrategias de respuesta a los riesgos. Sin embargo, para cada riesgo, se debe seleccionar la estrategia o la combinación de estrategias con mayor probabilidad de eficacia.

7.3.5 Control de riesgos

El control de riesgos, es el proceso de implementar los planes de respuesta elaborados, dar seguimiento a los riesgos identificados, identificar nuevos riesgos y evaluar

la efectividad del proceso de gestión en el proyecto. El beneficio clave de este proceso, es que mejora la eficiencia de la gestión de riesgos a lo largo del ciclo de vida del proyecto para optimizar de manera continua las respuestas a los riesgos. Así, numerosos procesos de control utilizan el análisis de variación para comparar los resultados planificados con los resultados reales.

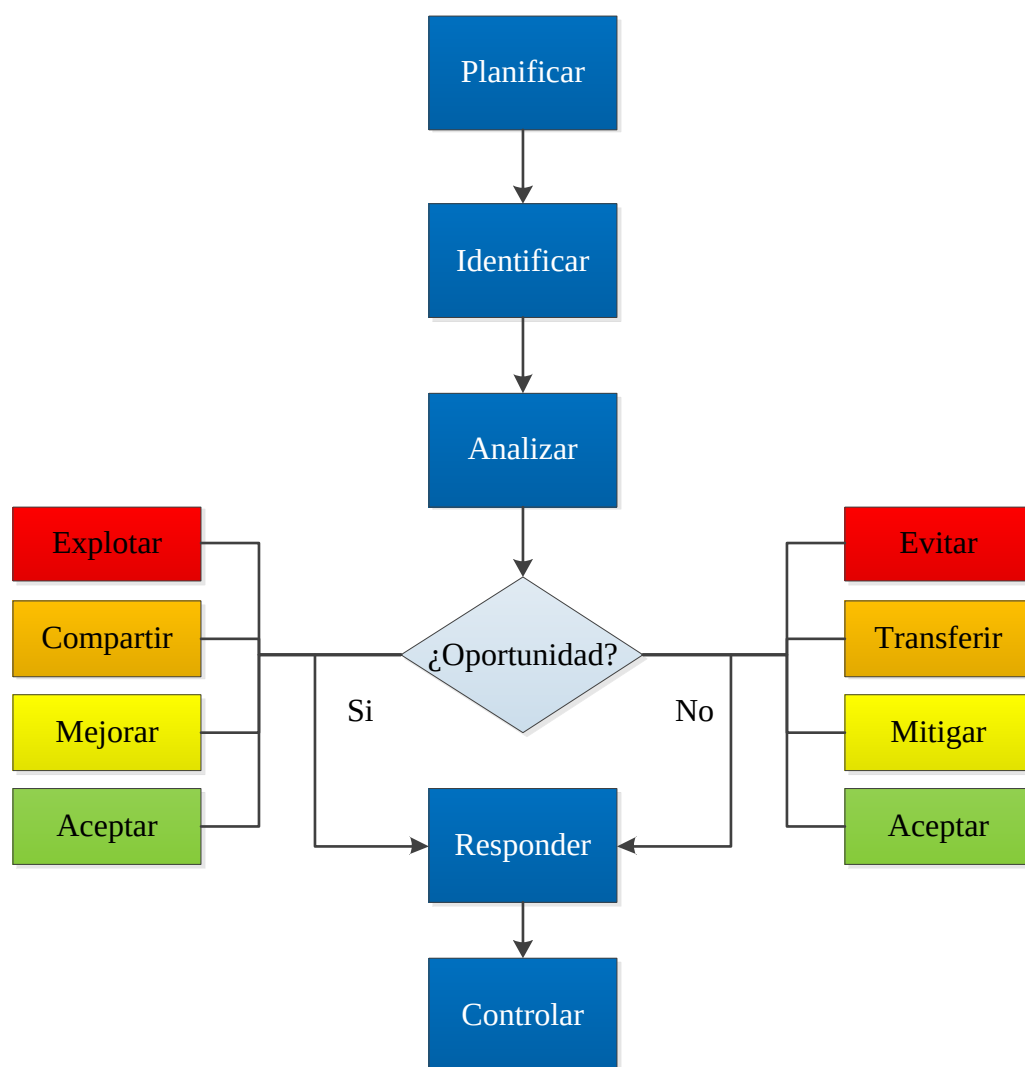


Figura N° 16: Metodología plan de gestión de riesgo

7.4 Desarrollo del plan de gestión de riesgos

Presentada y comprendida la metodología propuesta por el PMI, (2013) para la generación de un plan de gestión de riesgo, se cuenta con los conocimientos apropiados para dar inicio al desarrollo de cada una de las fases presentadas. Para llevar a cabo este cometido, se conformó un equipo de trabajo multidisciplinario, cuyos miembros han participado de paradas de planta anteriores, por lo que estos, aportaran su experiencia y conocimientos en las temáticas de interés. Una vez terminado el plan de gestión de riesgo, el trabajo será evaluado por la jefatura del área de proyectos, quien, en caso de estar conforme con las medidas propuestas, procederá a validar las decisiones adoptadas para cada uno de los riesgos identificados, así, implementar las acciones correspondientes en el próximo evento de parada.

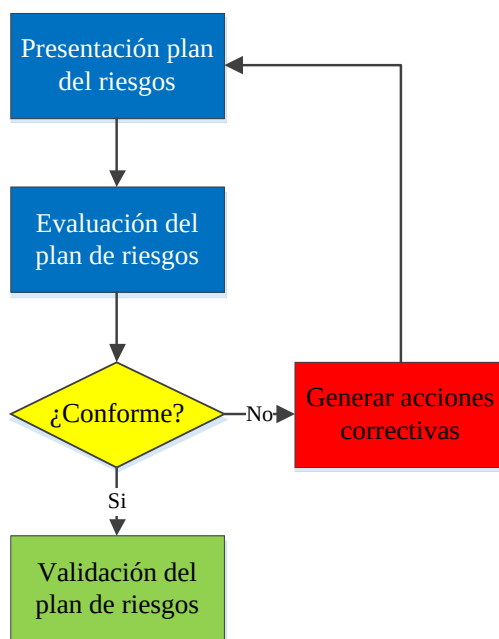


Figura N° 17: Diagrama de validación del plan de riesgos

7.4.1 Planificación de la gestión de los riesgos

Conformado el equipo multidisciplinario con personal perteneciente al área de mantenimiento, operaciones y proyectos, el autor del presente trabajo de título procede a guiar a los participantes hacia temáticas que permitan definir cómo realizar las actividades de gestión de riesgos y con ello establecer las actitudes que Codelco Ventas asumirá.

En primer lugar, se elaborara una escala ordinal encargada de medir el nivel de probabilidad de ocurrencia de los eventos que posteriormente serán definidos como riesgosos, en donde Muy Baja (1), representa la probabilidad casi nula de que un evento ocurra y Muy Alta (5), representa la probabilidad que el evento acontezca con un alto nivel de certeza. Lo anterior, se resumen por medio de la tabla N°16.

Probabilidad	Nivel
Muy Baja	1
Baja	2
Media	3
Alto	4
Muy Alto	5

Tabla N° 16: Escala de probabilidad cualitativa

Posteriormente, se elaboró una matriz de escala ordinal cuya finalidad es medir el grado de impacto que tiene la ocurrencia de un evento, sobre los principales objetivos del proyecto. De este modo, en caso que el evento represente una oportunidad para la parada, el impacto será Muy Bajo (1) si el costo de la parada disminuye en menos de 7.000 dólares, el cronograma se reduce en menos de 1 día, el alcance aumenta en forma insignificante o la calidad del proyecto aumenta de manera imperceptible. Por otra parte, la ocurrencia del evento tendrá un impacto Muy Alto (10), si el costo de la parada disminuye en más de

50.000 dólares, el cronograma se reduce en más de 4 días, el alcance aumenta de manera drástica o la calidad del proyecto alcanza el grado de excelencia.

Impacto	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
Objetivo	1	2	3	5	10
Costo en miles [USD]	< 7	7 - 20	20 - 35	35 - 50	> 50
Cronograma [día]	< 1	1 - 1.5	1.5 - 2	2 - 4	> 4
Alcance	Insignificante	Menor	Considerable	Mayor	Drástica
Calidad	Imperceptible	Poco Perceptible	Perceptible	Muy Perceptible	Excelencia

Tabla N° 17: Matriz de escala impacto positivo

En caso contrario que el evento represente una amenaza para la parada, el impacto será Muy Bajo (1) si el costo del evento es menor a 5.000 dólares, genera retrasos menores a 1 día, el alcance de la parada se ve reducido en forma insignificante o la calidad del proyecto disminuye de manera imperceptible. Por otra parte, la ocurrencia de un evento tendrá un impacto Muy alto (10), si tiene costos mayores a 20.000 dólares, genera retrasos mayores a 10 días, el alcance se ve reducido en forma drástica o la calidad del proyecto alcanza el grado de inaceptable.

Impacto	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
Objetivo / Grado	1	2	3	5	10
Costo en miles [USD]	< 5	5 - 8	8 - 15	15 - 20	> 20
Cronograma [día]	< 1	1 - 3	3 - 7	7 - 10	> 10
Alcance	Insignificante	Menor	Considerable	Mayor	Drástica
Calidad	Imperceptible	Poco Perceptible	Perceptible	Muy Perceptible	Inaceptable

Tabla N° 18: Matriz de escala de impacto negativo

Una vez definida la escala de probabilidad de ocurrencia de los eventos como también, la matriz de escala de impacto sobre los objetivos del proyecto, se procede a elaborar la matriz de riesgo, la cual queda determinada al realizar el producto entre el nivel de probabilidad y el grado de impacto que trae consigo la ocurrencia de un evento. Lo anterior, se muestra en forma resumida en la tabla N° 19.

		Matriz de riesgo Oportunidades / Amenazas				
		Impacto				
		Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
Probabilidad		1	2	3	5	10
1	Muy Baja	1	2	3	5	10
2	Baja	2	4	6	10	20
3	Media	3	6	9	15	30
4	Alta	4	8	12	20	40
5	Muy Alta	5	10	15	25	50

Tabla N° 19: Matriz de riesgo Oportunidades y Amenaza

En base a los resultados obtenidos, el equipo de trabajo procedió a definir los umbrales y tolerancias que describirán el riesgo que Codelco Ventana soportará en su próxima parada de planta, utilizando distintos colores sobre la matriz de riesgo los que a su vez, permitirán definir estrategias de acción genéricas para los eventos positivos y negativos que posteriormente serán identificados.

Riesgos Positivos / Oportunidades			
Tolerancia	Prioridad	Estrategia	Significado de cada estrategia
1 a 4	Baja	Aceptar	No hacer nada
5 a 10	Medio	Mejorar	Acciones para aumentar la probabilidad y/o impacto
11 a 24	Alta	Compartir	Trasladar el riesgo a un tercero
25 a 50	Muy Alta	Explotar	Hacer que el evento se concrete

Tabla N° 20: Resumen estrategias de oportunidades

Riesgos Negativos / Amenazas			
Tolerancia	Prioridad	Estrategia	Significado de cada estrategia
1 a 4	Baja	Aceptar	Dejar por escrito que se hará
5 a 10	Medio	Mitigar	Acciones para disminuir la probabilidad y/o impacto
11 a 24	Alta	Transferir	Trasladar el riesgo a un tercero
25 a 50	Muy Alta	Evitar	No avanzar en el proyecto hasta disminuir su riesgo

Tabla N° 21: Resumen estrategias de amenazas

7.4.2 Identificar los riesgos

Una vez realizada la planificación de la gestión de los riesgos, se inicia con el proceso de identificación de riesgos los cuales podrían afectar al proyecto de manera positiva o negativa. Para esto, el equipo conformado anteriormente, utilizó la metodología de tormenta de ideas (brainstorm) de tal modo considerar la mayor cantidad de sucesos que puedan afectar seriamente en la parada, aun cuando su probabilidad de ocurrencia sea baja.

R °	Descripción del Riesgo
R1	Accidente laboral de gravedad
R2	Alto grado de integración entre los distintos equipos de trabajo
R3	Alto grado de motivación y compromiso en empresas contratistas
R4	Atraso en la realización de las reuniones de arranque
R5	Control de calidad inadecuado
R6	Derrame de ácido sulfúrico
R7	Dificultad del contratista de instalarse en la división
R8	El contratista no finaliza las obras a tiempo
R9	Falla el abastecimiento de partes y piezas para los equipos
R10	Falla en la comunicación del equipo de trabajo
R11	Falta de capacitación del personal
R12	Implementación de tecnología más eficiente para el mantenimiento
R13	Inadecuado sistema de seguridad que conlleve a robo de herramientas
R14	Paro del personal
R15	Se gasta más de lo presupuestado
R16	Trabajo no programado

Tabla N° 22: Identificación de riesgos

7.4.3 Análisis de riesgos

Una vez identificado los eventos riesgos, el análisis de los mismos se lleva a cabo en forma cualitativa y cuantitativa tal como fue presentado en el punto 7.3.3.

7.4.3.1 Análisis cualitativo del riesgo

Para llevar a cabo el análisis cualitativo de los riesgos, es preciso asignar una probabilidad de ocurrencia a los eventos riesgosos identificados haciendo uso de la escala definida en la tabla N° 16. A su vez, se debe identificar si el evento bajo estudio corresponde a una oportunidad o una amenaza, ya que según sea el caso se hará uso de la matriz de escalas de impacto positiva o negativa presentadas en las tablas N° 17 y 18 respectivamente. De este modo, identificada la tabla de impacto a ser utilizada, se procede a determinar sobre qué objetivo del proyecto tiene efecto la ocurrencia del evento y con ello, se procede a asignar el nivel de impacto según corresponda.

Presentada la forma en que el equipo de trabajo llevará a cabo el análisis en cuestión, se procede a explicar la razón por la cual se asigna el grado de impacto y nivel de probabilidad a cada evento riesgoso identificado en el punto anterior.

- R1. Los costos estimados del proyecto pueden verse afectados gravemente frente a la ocurrencia de un accidente laboral de gravedad, ya que Codelco Ventanas asumirá con todas las responsabilidades implicadas. Según los expertos, esto podría ascender por sobre los 20.000 dólares si no se toman las medidas adecuadas, por lo que en ese caso se estima una probabilidad de ocurrencia muy alta para este evento.

- R2. Comprobado es el hecho de que un alto grado integración entre los equipos de trabajo tiene efectos positivos en la ejecución de las distintas tareas y actividades a realizar en un proyecto, situación que se ha traducido en una reducción de entre 2 y 3 días en paradas de planta anteriores. Sin embargo, el equipo de trabajo comenta que esto es muy difícil de lograr pese a los constantes esfuerzos y por ello la probabilidad de ocurrencia es baja.
- R3. Al igual que el anterior evento, el alto grado de motivación y compromiso en empresas contratistas tiene efectos positivos sobre el proyecto, lo que según miembros del equipo podría traducirse en una reducción del cronograma de entre 2 a 4 días. Sin embargo, la realidad es otra y las empresas solo se interesan por cumplir con los plazos estipulados, por lo que se estima que la probabilidad de ocurrencia de este evento es baja.
- R4. El atraso en la reuniones de arranque para la entrega de documentación es un evento que afecta de manera directa el cronograma del proyecto aumentando el tiempo de duración del mismo entre 1 a 3 días, ya que las empresas contratistas no pueden hacer ingreso a la división. Sin embargo, el equipo de trabajo comenta que el área de control y fiscalización de terceros tiene implementado un protocolo para estas ocasiones por lo que se estima que la probabilidad de ocurrencia de este evento es baja.
- R5. Un control inadecuado en la calidad de las actividades de mantenimiento, traerá consigo un impacto medio en el proyecto reduciendo la calidad del mismo de forma

perceptible, por lo que los expertos comentan se deberán realizar paradas de la planta no planificadas en caso que no se tome control sobre esta situación. Sin embargo, los expertos también comentan, que se cuenta con personal que realiza inspecciones periódicas en las distintas áreas de trabajo, por lo que estiman una probabilidad de ocurrencia media para este evento.

- R6. Los costos estimados del proyecto podrían aumentar entre 5.000 y 8.000 dólares en caso de derrame de ácido sulfúrico si no se toman las medidas adecuadas, ya que se deberá solicitar personal de emergencia especializado para eliminar el peligro. Dado que el trabajo será ejecutado en una planta de ácido, los expertos estima una probabilidad de ocurrencia alta para este evento.
- R7. El hecho de que el contratista tenga dificultad de instalarse en la división afecta en forma directa el cronograma de actividades del proyecto aumentando el tiempo de duración del mismo entre 1.5 a 2 días si no se toman las medidas adecuadas, ya que las dotaciones no tendrán vestidores de cambio y lugar físico donde dejar las herramientas necesarias para desarrollar las actividades de mantenimiento. De este modo, los expertos estima una probabilidad de ocurrencia media para este evento.
- R8. En caso de que las empresas contratistas no finalicen a tiempo la ejecución de sus trabajos, afectará de manera directa el cronograma del proyecto aumentando el tiempo duración del mismo entre 7 a 10 días. Lo anterior, se basa en la experiencia de los expertos, quienes añaden que esta situación es reiterativa en proyectos de esta índole, por lo que estiman una probabilidad de ocurrencia alta para este evento.

- R9. El atraso en los tiempos de entrega por parte de los proveedores de partes y piezas para los equipos, traerá consigo un impacto negativo al proyecto, aumentando la duración del mismo entre 7 y 10 días según comentan los expertos, ya que las actividades de mantenimiento deberán ser detenidas a la espera de stock. Así, el equipo de trabajo estima una probabilidad de ocurrencia media para este evento.
- R10. La deficiente comunicación entre líderes y subordinados trae consigo un impacto alto en el cronograma del proyecto, aumentando el tiempo de duración del mismo entre 7 a 10 días, pues se realizan actividades que no estaban programadas o se ejecutan tareas ya realizadas por otro equipo de trabajo. Según comentan los expertos, esta situación es habitual en empresas contratistas por lo que estiman una probabilidad de ocurrencia media para este evento.
- R11. La falta de capacitación del personal traerá consigo un impacto alto en el proyecto reduciendo la calidad del mismo de forma muy perceptible, ya que los equipos tenderá a fallas a corto plazo provocando eventuales detenciones no planificadas en caso que no se tomen medidas adecuadas. Sin embargo, los expertos comentan, que Codelco Ventanas intenta trabajar con empresas que han tenido buenos resultados en licitaciones pasadas, por lo que estiman una probabilidad de ocurrencia baja para este evento.
- R12. El hecho de que empresas contratistas cuenten con tecnología más eficiente para llevar a cabo la ejecución de las tareas de mantenimiento, trae consigo un impacto

alto en el proyecto, disminuyendo el tiempo de duración del mismo entre 2 a 4 días, sin embargo, los expertos estiman una probabilidad de ocurrencia baja para este evento, ya que generalmente las empresas no tiene incentivos en la inversión de este tipo de activo y trabajan con tecnologías ya comprobadas.

R13. Los costos estimados del proyecto podrían aumentar entre 8.000 y 15.000 dólares en el caso de contar con un sistema de seguridad inadecuado que conlleve, al robo de herramientas, ya que se deberán reponer los artículos para continuar con las actividades programadas. Sin embargo, Codelco Ventanas cuenta con resguardo de seguridad en todos los puntos de acceso por lo que el equipo de trabajo estima una probabilidad de ocurrencia muy baja para este evento.

R14. El hecho de que ocurra el paro del personal traería consigo un muy alto impacto sobre el cronograma del proyecto, pudiendo aumentar el tiempo de duración del mismo en más de 10 días. En base a esto, el equipo de trabajo comenta que generalmente el personal que se paraliza es de las empresas contratistas y que en este caso, los servicios específicos no lo hacen. En base a esta explicación, los expertos estima una probabilidad de ocurrencia baja para este evento.

R15. Los costos estimados del proyecto podrían aumentar más de 20.000 dólares en caso de que las aproximaciones presupuestarias se encuentren erradas, ya que en ocasiones existen actividades nuevas que son añadidas al cronograma y no existen antecedentes necesario para llevar a cabo una buena estimación de estos y con ello, existe deficiente control presupuestario en la mayoría de los proyectos según

comentan los expertos. En base a esto, el equipo de trabajo estima una probabilidad de ocurrencia media para este evento.

- R16. El hecho de que comenzadas las actividades del proyecto de parada se identifiquen trabajos no planificado trae consigo un impacto mayor sobre el alcance del proyecto, ya que no serán ejecutadas todas las tareas necesarias para alcanzar el cumplimiento de todos los entregables. En base a esto, los expertos estima una probabilidad de ocurrencia baja para este evento, pues el equipo de trabajo encargada de planificar y programar las actividades cuenta con vasta experiencia en paradas anteriores.

Finalmente, en base a los antecedentes presentados, se realiza la priorización de riesgos combinando la probabilidad de ocurrencia de los eventos con el impacto de los mismos sobre los objetivos del proyecto haciendo uso de la matriz de riesgo elaborada en la etapa de planificación mostrada en la tabla N°19. El trabajo realizado anteriormente, es presentado a continuación.

R °	Descripción de Riesgo	Tipo	Prob.	Impa.	Riesgo	Prioridad
R8	El contratista no finaliza las obras a tiempo	Amenaza	4	10	40	Muy Alta
R11	Falta de capacitación del personal	Amenaza	3	10	30	Muy Alta
R15	Se gasta más de lo presupuestado	Amenaza	3	10	30	Muy Alta
R1	Accidente laboral de gravedad	Amenaza	5	5	25	Muy Alta
R3	Alto grado de motivación y compromiso en empresas contratistas	Oportunidad	2	10	20	Alta
R14	Paro del personal	Amenaza	2	10	20	Alta
R9	Falla el abastecimiento de partes y piezas para los equipos	Amenaza	3	5	15	Alta
R10	Falla en la comunicación del equipo de trabajo	Amenaza	3	5	15	Alta
R6	Derrame de ácido sulfúrico	Amenaza	4	3	12	Alta
R2	Alto grado de integración entre los distintos equipos de trabajo	Oportunidad	2	5	10	Medio
R12	Implementación de tecnología más eficiente	Oportunidad	2	5	10	Medio
R16	Trabajo no programado	Amenaza	2	5	10	Medio
R5	Control de calidad inadecuado	Amenaza	3	3	9	Medio
R7	Dificultad del contratista de instalarse en la división	Amenaza	3	3	9	Medio
R4	Atraso en la realización de las reuniones de arranque	Amenaza	2	2	4	Baja
R13	Inadecuado sistema de seguridad que conlleve a robo de herramientas	Amenaza	1	3	3	Baja

Tabla N° 23: Priorización de eventos riesgosos

7.4.3.2 Análisis cuantitativo del riesgo

Para llevar el análisis este análisis, el equipo de trabajo realiza una estimación de la probabilidad de ocurrencia de cada evento de forma numérica en base a la tabla N°16.

Nivel	Probabilidad
Muy Baja	10%
Baja	20%
Media	50%
Alto	70%
Muy Alto	80%

Tabla N° 24: Escala de probabilidad cuantitativa

Por otra parte, el impacto de los eventos se realiza en términos monetarios, siendo consistentes con lo ya realizado en el análisis cualitativo y basándose en la experiencia de los expertos. Lo anterior, permitirá determinar en forma más precisa los niveles de reservas de contingencia necesarias a considerar.

R °	Descripción de Riesgo	Tipo	Prob.	Impa. [USD]	V.E
R1	Accidente laboral de gravedad	Amenaza	0,80	21.500	17.200
R2	Alto grado de integración entre los distintos equipos de trabajo	Oportunidad	0,20	43.000	-8.600
R3	Alto grado de motivación y compromiso en empresas contratistas	Oportunidad	0,20	50.000	-10.000
R4	Atraso en la realización de las reuniones de arranque	Amenaza	0,20	5.100	1.020
R5	Control de calidad inadecuado	Amenaza	0,50	8.250	4.125
R6	Derrame de ácido sulfúrico	Amenaza	0,70	8.000	5.600
R7	Dificultad del contratista de instalarse en la división	Amenaza	0,50	8.900	4.450
R8	El contratista no finaliza las obras a tiempo	Amenaza	0,70	23.000	16.100
R9	Falla el abastecimiento de partes y piezas para los equipos	Amenaza	0,50	15.000	7.500
R10	Falla en la comunicación del equipo de trabajo	Amenaza	0,50	15.000	7.500
R11	Falta de capacitación del personal	Amenaza	0,50	23.000	11.500
R12	Implementación de tecnología más eficiente para mantenimiento	Oportunidad	0,20	38.000	-7.600
R13	Inadecuado sistema de seguridad que conlleve a robo de herramientas	Amenaza	0,10	11.000	1.100
R14	Paro del personal	Amenaza	0,20	28.000	5.600
R15	Se gasta más de lo presupuestado	Amenaza	0,50	27.000	13.500
R16	Trabajo no programado	Amenaza	0,20	18.000	3.600
				Total [USD]	72.595

Tabla N° 25: Reserva para contingencias

En el trabajo realizado por Vásquez, (2016), fueron estimados 74.771 dólares de reservas de contingencia. Comparado con los 72.595 dólares determinados en esta ocasión,

solo existen 2.176 dólares de diferencia, sin embargo, el análisis realizado por el equipo de trabajo permitirá desarrollar estrategias para combatir o potenciar los distintos eventos riesgos identificados agregando valor a la gestión del proyecto. Así, una vez cualificados y cuantificados los riesgos, se procederá a generar un plan de respuesta a los mismos.

7.4.4 Plan de respuesta a los riesgos

Una vez realizado el proceso de análisis de riesgos, se procede a elaborar un plan de respuesta a la ocurrencia de eventos riesgosos en base a las estrategias predefinidas en función de la prioridad determinada, de este modo, se buscan opciones y acciones para mejorar las oportunidades y reducir las amenazas en base a los objetivos del proyecto.

R °	Descripción de Riesgo	Tipo	Estrategia	Respuestas Planificadas
R8	El contratista no finaliza las obras a tiempo	Amenaza	Evitar	• Establecer multas en la base de la licitación de empresas contratistas. • Realizar seguimiento periódico al programa de las actividades del contratista. • Realizar control riguroso del avance de los trabajos tres veces por semana.
R11	Falta de capacitación del personal	Amenaza	Evitar	• Adjudicar licitaciones a empresas contratistas que han trabajado con anterioridad para Codelco Venta. • Trabajar con empresas contratistas certificadas con norma ISO 9001. • Buscar empresas con el perfil requerido y que asegure la capacitación de su personal.
R15	Se gasta más de lo presupuestado	Amenaza	Evitar	• Considerar reservas de seguridad para actividades en donde no se tenga antecedentes. • Apoyo de asesores externo para la estimación de costos de los cuales no se tiene historial.

R °	Descripción de Riesgo	Tipo	Estrategia	Respuestas Planificadas
R1	Accidente laboral de gravedad	Amenaza	Evitar	- Contratar prevencionistas de riesgo adicionales para supervisión de trabajos. - Verificar rigurosamente que todo el personal cuente con equipo de protección personal. - Disponer vehículos de emergencia para movilizar oportunamente al personal accidentado. - Inducciones sobre trabajo en espacios confinados.
R3	Alto grado de motivación y compromiso en empresas contratistas	Oportunidad	Compartir	- Incentivos y beneficios para el personal participante por entrega de trabajos en los tiempos establecidos. - Bonificaciones a las empresas contratista por el buen desempeño.
R14	Paro del personal	Amenaza	Transferir	- Contratos que obliguen a negociar colectivamente mientras personal continúe con la ejecución del programa. - En caso de prever el paro del personal, aplazar el inicio del proyecto.
R9	Falla el abastecimiento de partes y piezas para los equipos	Amenaza	Transferir	- Adaptar contratos que establezcan multa al proveedor en caso de incumplimiento. - Asesoría externa para estimar los niveles de stock de partes y piezas. - Programar órdenes de compra para evitar retardos en la entrega.
R10	Falla en la comunicación del equipo de trabajo	Amenaza	Transferir	- Promover la comunicación entre líderes y subordinados. - Promover comunicación en forma directa.
R6	Derrame de ácido sulfúrico	Amenaza	Transferir	- Contratar equipo de emergencias química para el control de derrame, desechos y material contaminado. - Instalación de duchas y lavaojos de emergencia adicionales.
R2	Alto grado de integración entre los distintos equipos de trabajo	Oportunidad	Mejorar	- Hacer comités de obra periódicamente con los representantes de las empresas contratistas. - Promover la colaboración entre las distintas empresas.

R °	Descripción de Riesgo	Tipo	Estrategia	Respuestas Planificadas
R12	Implementación de tecnología más eficiente para el mantenimiento	Oportunidad	Mejorar	• Establecer en las bases de la licitación las tecnologías mínimas que deben contar las empresas contratistas. • Ofrecer incentivos para el uso de nuevas tecnologías.
R16	Trabajo no programado	Amenaza	Mitigar	• Conformar equipo de trabajo multidisciplinario que verifique programación. • Contemplar este imprevisto con un porcentaje adicional en las reservas de contingencia.
R5	Control de calidad inadecuado	Amenaza	Mitigar	• Inspecciones rigurosas de control de calidad por parte de personal capacitado.
R7	Dificultad del contratista de instalarse en la división	Amenaza	Mitigar	• Contar con un listado de containers disponibles y su ubicación en la división para adaptarlos como vestidores.
R4	Atraso en la realización de las reuniones de arranque	Amenaza	Aceptar	• Generar pases provisorios para dotaciones de empresas contratista que aún no presenten la documentación necesaria.
R13	Inadecuado sistema de seguridad que conlleve a robo de herramientas	Amenaza	Aceptar	• Solicitar rutitas de vigilancia con mayor frecuencia en los alrededores donde son almacenadas herramientas.

Tabla N° 26: Plan de respuesta al riesgo

Es preciso mencionar, que las respuestas planificadas a los riesgos incluyen actividades y recursos los cuales deberán ser considerados en el presupuesto y el cronograma del proyecto. Considerar que el plan de riesgo mostrado, fue validado por la jefatura del área de proyectos, por lo que las medidas documentadas, serán puntas en ejecución en el próximo evento de parada.

7.4.5 Control de riesgos

Finalmente en la etapa de control de riesgos, se procederá a implementar los planes de respuesta elaborados para luego monitorear los riesgos identificados. Para llevar a cabo este último cometido, se realizarán reuniones periódicas las cuales a su vez, mantendrán actualizada la información referente al estado del proyecto. En base a los antecedentes obtenidos en las reuniones a realizar, se identificarán nuevos riesgos y se evaluará la efectividad del plan de respuesta implementado, de tal modo, ejecutar acciones correctivas en caso de ser necesario que permitan redefinir los planes de respuesta.

El plan de gestión de riesgos elaborado, pretende disminuir la incertidumbre intrínseca presente en todo proyecto y en especial en aquello en donde se ven comprometidos gran cantidad de recursos económicos, tecnológicos y humanos, adoptando actividades específicas a realizar frente a la eventualidad de los riesgos identificados, los cuales deberán ser controlados y monitoreados para comprobar la efectividad de las acciones propuestas. Vale mencionar, que este trabajo no es la solución definitiva a los problemas que conlleva el evento de parada, por lo que deberá ser mejorado de manera progresiva por el personal participante.

8 CONCLUSIONES

En este apartado son analizados y justificados los hallazgos realizados a lo largo del presente trabajo de título. En primer lugar, la recopilación y organización bibliográfica orienta a conocer el proceso productivo de Codelco Ventanas, permitió identificar el papel protagónico que tiene la planta de ácido dentro del mismo, ya que, se encarga captar los gases provenientes de fundición para limpiarlos y descargarlos libres de azufre a la atmósfera y a su vez, producir el ácido sulfúrico utilizado en los procesos de lixiviación, electroobtención y electrorrefinación para la obtención de cátodos de cobre. En base a lo anterior, se desprende la importancia de mantener la planta con un elevado nivel de disponibilidad, pues frente a una parada de emergencia trae consigo de la detención total del proceso de transformación del cobre.

Por otra parte, la recopilación y organización de información bibliográfica orientada a conocer procedimientos, prácticas y metodologías que guardan relación con la parada de una planta, otorgó la posibilidad ver el evento en cuestión como un proyecto y por ende, comprender que el éxito de la misma se basa en planificar, programar, controlar y gestionar los recursos involucrados de forma eficiente. Por consiguiente, se desprende que la parada de una planta para su mantenimiento no es posible de estandarizar, ya que las medidas que se adoptan en cada caso son específicas y dependen de factores internos y externos de la organización y la planta en cuestión. Sin embargo, siempre existirá la posibilidad de adaptar las técnicas y metodologías en función de las necesidades particulares.

Por su parte, la recopilación y organización de antecedentes relacionados con la situación actual mediante la cual es realizada la parada de la planta, permitió conocer y pre-evaluar las técnicas y metodologías en las cuales el personal a cargo de dirigir el proyecto basa la toma de sus decisiones y con ello, establecer un punto de partida para el posterior análisis. En el caso de los activos, se identifica el uso del análisis de criticidad total por riesgo para clasificar los equipos en función de las frecuencias de falla y las consecuencias que trae consigo la misma. Por otra parte, para determinar el presupuesto con el cual debe contar la planta, se utiliza la estimación por analogía, considerando el costo de servicios anteriormente contratados. A su vez, es aplicada la técnica PERT para programar las actividades a realizar en la parada y la herramienta del Earned Value Management para el control del alcance, cronograma y costo del proyecto.

Posteriormente, el análisis y posterior diagnóstico de las técnicas, herramientas y metodologías implementadas en la actualidad en el evento de parada, permitió evaluar y validar la forma en que hoy en día el personal a cargo de dirigir la parada, basa la toma de sus decisiones y a su vez, identificar oportunidades de mejoramiento las cuales se dejaron en evidencia debido a la ausencia de acciones diferenciadoras de mantenimiento que expliquen la forma en que se orientarán los recursos hacia los diferentes activos en función de su criticidad, ya que sin estas, la jerarquización de activos no tiene valor alguno. Por otra parte, se detectó la falta de medidas concretas que permitan atender las situaciones no deseadas. El diagnóstico anterior, permitió establecer el punto de partida para proponer la elaboración de un plan de acción de mantenimiento que complemente la jerarquización de los activos realizada y a su vez, un plan de gestión de riesgos, que disminuya la incertidumbre presente en el proyecto.

De este modo, la elaboración del plan de acción de mantenimiento realizado para los activos críticos de la planta mediante el análisis de causa raíz, permitió generar acciones específicas de mantenimiento orientadas a complementar las actividades ya realizadas y disminuir o en el mejor de los casos eliminar las fallas reiterativas de los equipos bajo análisis. Lo anterior, traerá como beneficio la focalización de esfuerzos y recursos en los activos críticos de la planta, mejorar los tiempos de respuesta en la ejecución de actividades de mantenimiento al contar con el trabajo específico a realizar como también, disponer del stock de partes y piezas adecuados para la intervención. Vale mencionar que el análisis realizado, deberá ser mejorado de manera progresiva y extenderse en el mediano plazo, hacia los activos semi-críticos de la planta con la finalidad de aumentar la disponibilidad de la misma.

Finalmente, la elaboración del plan de gestión de riesgos realizado mediante la metodología que entrega el PMI (2013), permitirá disminuir el grado de incertidumbre presente en el evento de parada, ya que proveerá respuestas frente a la ocurrencia de eventos riesgos identificados, dando flexibilidad al proyecto en el caso de eventualidades. Lo anterior, mejorará la toma de decisiones al contar con respuestas pre-definidas frente a la ocurrencia de los riesgos identificados, aumentará el control del proyecto al igual que la probabilidad de éxito del mismo. Además, traerá consigo la disminución del estrés por parte del personal a cargo de dirigir y liderar las distintas actividades, ya que se tendrá respaldo de las decisiones a tomar. De lo anterior, se desprende que el proceso de identificación de riesgos deberá ser realizado en manera periódica, de tal modo, mejorar continuamente el plan de riesgos elaborado, así como también, monitorear los riesgos identificados y comprobar la efectividad de las medidas adoptadas.

9 REFERENCIAS

- Aguilar, J., Torres, R. y Magaña, D. (2010). Failure mode and effects and criticality analysis (FMECA) for maintenance planning using risk and safety criteria. 25, 15–26.
- Amendola, L. (2005). *Dirección y Gestión de Paradas de Planta*. España, Sevilla.
- Arata, A. (2008). *Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales* (Ril). Chile, Viña del Mar.
- Cabeza, M. A., Cabeza, M. E., y Corredor, E. (2010). Principales Concepciones De La Gestión Del Mantenimiento Una Nueva Visión Gerencial. *Universidad Ciencia Y Tecnologia*, 14(55), 139–146.
- Codelco. (2015). *Informe Anual 2015* (Vol. 18).
- Figuerola, O. (2015). *Definición de plan de mantenimiento óptimo para equipos críticos de una planta de laminación*. Universidad de Chile.
- Olarte, W., Botero, M., y Cañon, B. (2010). Importancia del Mantenimiento Industrial dentro de los Procesos de Producción. *Scientia et Technica*, 16(44), 354–356.
- Parra, C. y Crespo, A. (2012). Técnicas de Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicadas en el proceso de Gestión de Activos. Nota técnica 5: Métodos de Análisis de Criticidad y Jerarquización de Activos.
- Pistarelli, A. (2013). *Manual de Mantenimiento Ingeniería, Gestión y Organización* (R y C). Argentina, Buenos Aires.

- PMI. (2013). *Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (guía del PMBOK®)*. Project Management Institute, Inc.
- Prando, R. (1996). *Manual de Gestión de Mantenimiento a la Medida* (Piedra San). Guatemala, Piedra Santa.
- Quintana, A., Pisani, M., y Casal, R. (2015). Desempeño de cartas de control estadístico con límites bilaterales de probabilidad para monitorear procesos Weibull en mantenimiento. *Ingeniería, Investigación Y Tecnología*, 16(1), 143–156.
- Rodríguez, Á. (2010). La gestión de los activos físicos en la función mantenimiento. *Ingeniería Mecánica*, 13(2), 72–78.
- Sereno, S. (2013). *Elaboración de planes de mantenimiento centrado en confiabilidad a equipos de planta Kimberly-Clark*. Universidad Simón Bolívar.
- Vásquez, R. (2016). *Estudio para la Optimización de la Mantención General, en Planta de Ácido Sulfúrico de Codelco Ventanas*. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Vera, H. (2011). *Aplicación de la metodología Análisis Causa Raíz (RCA). para la eliminación de un mal actor en equipos críticos de la SOM - ECOPETROL S.A.* Univesidad Industrial de Santander.
- Viveros, P., Kristjanpoller, F., Barbera, L. y Crespo, A. (2013). Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo. *Revista Chilena de Ingeniería*, 21(1), 125–138.
- Zampolli, M. (2012). *Guía básica para la implementación de la gestión de activos en empresas de energía*.